



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Estudi del ultrapassament en el Port de Cala Ratjada i solucions.

Treball realitzat per:

**Lluís Calvera Belil**

Dirigit per:

**Andrea Marzedou**

**Francesc Xavier Gironella i Cobos**

Grau en:

**Enginyeria D'Obres Públiques.**

Barcelona, **divendres 24 de Gener del 2019.**

Departament d'Enginyeria Civil

Secció d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**



## **AGRAÏMENTS**

Ha sigut tot un viatge i una experiència realitzar aquest extens treball. I en aquest trajecte no em puc oblidar de certes persones que d'alguna manera han tingut la seva aportació i formen part de la elaboració d'aquest estudi.

En primer lloc, agrair enormement l'orientació que m'han ofert el director i el codirector d'aquest estudi, el Xavier Gironella i Cobos, i l'Andrea Marzeddu. Se que no ha estat gens fàcil realitzar un seguiment d'aquest treball durant tant de temps, i tot i així, les seves pautes a seguir han donat un resultat excel·lent, i sens dubte han permès dur a terme aquest estudi. A més de tot el material facilitat, tant el programari, com el teòric, primordial en totes les fases del treball, moltes gràcies.

En segon lloc agrair al Mateu Barcelo, eninyer de Ports IB i responsable de l'explotació del port de Cala Ratjada. Contacte que ha sigut clau per anar avançant amb informació de proximitat. L'únic contacte que s'ha pogut aconseguir proper al port al llarg de tot l'estudi. La seva aportació informativa m'ha permès obtenir dades i documents referents al port, i que han facilitat enormement la seva realització.

En tercer lloc, m'agradaria agrair als ex alumnes Manuel Lombardero i Robert Masip, que amb la seva prèvia experiència amb el paquet de programació de TELEMAT-MASCARET, van permetre que el meu aprenentatge fos enormement més hàbil. De mateixa manera, agrair el suport que han donat tots els professionals del OPEN TELEMAT en facilitar la resolució de dubtes per internet.

Per últim, i es necessari per no haver deixat que m'aturés mai de fer el treball, agrair als meus pares Itziar i Ramon, en el suport constant, tant en ajuda com en moral per a que aquest estudi acabés agafant la forma que ha pres en el seu estat final.



# INDEX DE L'ESTUDI

<b>1.</b>	<b>MEMORIA.....</b>	<b>7</b>
1.1.	INTRODUCCIÓ .....	7
1.2.	OBJECTIUS .....	7
1.3.	UBICACIÓ DEL PORT .....	8
1.4.	ANTECEDENTS.....	11
1.5.	DESCRIPCIÓ DEL PORT.....	14
1.5.1.	BATIMETRIA I GEOLOGIA.....	15
1.5.2.	Geometria del port .....	17
1.5.2.1	ALINEACIÓ MORROT.....	17
1.5.2.2	ALINEACIÓ MIG.....	18
<b>2.</b>	<b>ANÀLISI .....</b>	<b>21</b>
2.1.	PROCEDIMENT D'ANÀLISIS .....	21
2.2.	CLIMA MARÍTIM.....	21
2.2.1.	CLIMA MIG.....	22
2.2.2.	CLIMA EXTREM .....	26
2.2.2.1	Càlcul coeficients Weibull.....	28
2.2.2.2	Càlcul relació Tp/Hs.....	30
2.3.	PROPAGACIÓ .....	31
2.3.1.	CÀLCUL EN AIGÜES PROFUNDES.....	32
2.3.2.	PROPAGACIÓ MITJANÇANT TOMAWAC.....	36
2.3.2.1	Procediment de propagació.....	36
2.3.2.2	Necessitat d'utilitzar Tomawac .....	40
2.3.2.3	GEOMETRIA (Batimetria i mallatge).....	42
2.3.2.3.1	DOMINI.....	42
2.3.2.3.2	BATIMETRIA.....	44
2.3.2.3.3	MALLATGE .....	47
2.3.2.4	Condicions de contorn .....	57
2.3.2.5	Condicions de simulació .....	60
2.3.2.5.1	CARACTERITZACIÓ DEL MAR .....	60
2.3.2.5.1.1	alçada d'ona .....	60
2.3.2.5.1.2	Període de pic .....	61
2.3.2.5.1.3	Direcció .....	62
2.3.2.5.2	CARACTERITZACIÓ DE L'ESPECTRE .....	65
2.3.2.5.2.1	VARIABLES.....	66
2.3.2.5.3	CARACTERITZACIÓ DEL TEMPORAL I DESCRIPCIÓ DELS RESULTATS.....	68
2.3.2.6	Resultats.....	73
2.4.	ULTRAPASSAMENT .....	86
2.4.1.	Determinació d'alçada d'ona de càlcul ( $H_D$ ).....	88
2.4.1.1	Alçada d'ona resultant per propagació.....	89
2.4.1.1.1	Determinació dels coeficients de Shoaling.....	89
2.4.1.1.2	Alçada d'ona per propagació, RESULTATS.....	92
2.4.1.2	Alçada d'ona resultant per efecte del trencament.....	93
2.4.1.2.1	Formulació utilitzada pel càlcul del trencament.....	94
2.4.1.2.2	Criteri d'anàlisi del càlcul del trencament.....	96
2.4.1.3	Alçada d'ona de càlcul. RESULTATS.....	97
2.4.2.	Càlcul del cabal d'ultrapassament $Q$ .....	98
2.4.2.1	Formulació utilitzada en el mètode analític del càlcul de l'ultrapassament.....	101
2.4.2.1.1	Formulació d'ultrapassament per discs verticals.....	101

2.4.2.1.2	Ultrapassament per dics Verticals, RESULTATS. ....	104
2.4.2.1.3	Formulació d'ultrapassament per dics compostos, talús amb mur de coronació. ....	104
2.4.2.1.3.1	Classificació geomètrica dels dics en talús en el càlcul del cabal d'ultrapassament. ...	105
2.4.2.1.3.2	Classificació segons tipus de material de la berma exterior. ....	107
2.4.2.1.4	Ultrapassament per a dics Compostos, RESULTATS. ....	109
2.5.	RESULTATS DE L'ANÀLISI .....	110
2.5.1.	<i>Límits tolerables d'ultrapassament.</i> .....	110
2.5.2.	<i>Cabals d'ultrapassament d'estudi.</i> .....	112
2.5.2.1	Coherència de resultats.....	112
2.5.2.1.1	Diferència entre talús i vertical.....	112
2.5.2.1.2	Comparativa amb l'observació de realitat.....	113
2.5.2.1.3	Comprovació amb els valors de control. ....	118
2.5.2.2	Conclusions dels resultats obtinguts. ....	118
<b>3.</b>	<b>SOLUCIONS.....</b>	<b>119</b>
3.1.	INTRODUCCIÓ ALTERNATIVES. ....	119
3.2.	ALTERNATIVES.....	120
3.2.1.	<i>ALINEACIÓ MORROT.</i> .....	120
3.2.2.	<i>ALINEACIÓ MIG.</i> .....	123
3.2.3.	<i>ALINEACIÓ COSTA.</i> .....	125
<b>4.</b>	<b>PERFILS.....</b>	<b>129</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>135</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>137</b>
<b>7.</b>	<b>ANNEXOS .....</b>	<b>139</b>

## **1. MEMORIA**

### **1.1. INTRODUCCIÓ**

Ens trobem a l'illa de Mallorca on un dels ports de categoria mitjana d'aquesta illa declara des de fa molts anys clars problemes per a dur a terme el seu servei en certs períodes de temporals. És aquest el port de Cala Ratjada, situat a la zona de llevant de l'illa balear.

Des de l'inici de la construcció d'aquesta estructura els problemes amb l'ultrapassament s'han fet evidents. Amb el pas del temps, l'activitat del port va creixent exponencialment, tant en el sector de la pesca, funció original d'aquest port, com en el sector del turisme i l'esbarjo. Però els continus problemes amb l'ultrapassament impedeixen massa freqüentment el correcte funcionament de les instal·lacions i serveis que ofereix aquest port.

Ports IB, titular d'aquest port, fa temps que reclama un projecte de millora i d'adequació del port per a garantir la seguretat de les embarcacions i la realització de totes les activitats que hi depenen d'ells. Cada cop més el port està més sol·licitat i alhora l'activitat pesquera està agafant una rellevància molt important a nivell balear. Però encara no pot garantir la màxima seguretat que requereix per condicions de tipologia de port, en part per problemes d'ultrapassament en temporals concrets.

L'ultrapassament és un fenomen molt complicat d'estudiar donat que les formulacions són molt estrictes a nivell de condicions geomètriques i de clima d'onatge, i normalment s'estudia en detall per a estructures on la protecció ha de ser màxima. L'ultrapassament genera problemes de servei i seguretat. I el principal problema que es troba per aquest port és la elevada freqüència en la que es donen aquests problemes, més d'un cop per any. És per això que es fa necessari i urgent estudiar i examinar correctament el fenomen d'ultrapassament per aquest port.

Tot i no ser tractat directament en el present estudi, els ultrapassaments màxims que es registren, també generen grans problemes d'agitació interna. Els grans volums que passen fan que els límits d'alçada d'ona per aquesta tipologia de port es superin fàcilment. Darrerament aquesta problemàtica està sent un dels principals focus d'atenció que estan posant els enginyers responsables del manteniment d'aquesta infraestructura.

### **1.2. OBJECTIUS**

Amb el present estudi es vol analitzar i avaluar la resposta del dic d'abric del port de Cala Ratjada per a períodes de temporals on l'onatge incideix de manera més directe. La història d'aquest port ve marcada per la clara problemàtica amb l'ultrapassament del dic exterior per aquest tipus de temporal. Aquests períodes es donen més sovint del que es desitjaria, implicant la correcta funcionalitat de gran part dels serveis del dic, així com la impossible pràctica de la pesca, activitat empresarial molt important per aquest port i poble.

L'objectiu principal d'aquest estudi resideix en calcular i estudiar l'ultrapassament que es pot arribar a donar per mètode analític, a partir dels criteris d'onatge establerts pel seu disseny. La estructura del document es pot descriure per la següent llista:

- Anàlisi del clima d'onatge. S'estudia de nou el clima d'onatge per la zona de treball, per incorporar les dades registrades en els darrers anys.
- Estudi de la propagació amb models numèrics. Per a tenir un valor exacte i així obtenir el màxim valor d'ultrapassament que es pugui donar al dic, es decideix fer l'estudi de propagació a partir d'un model numèric, dins del grup TELEMAT-MASCARET.
- Estudi dels criteris de trencament. S'estudia i s'analitza la formulació que millor cassi amb el port, segons informació recollides en informes i recollida en documentació gràfica real.
- Càlcul del cabal d'ultrapassament. Anàlisi de la formulació adequada segons la tipologia del port i càlcul dels resultats analítics.
- Conclusions i solucions. A partir dels resultats, analitzar correctament els seus valors, i seguidament extreure'n les conclusions corresponents. A més, es proposen possibles solucions, de tipus introductòria, per a reduir l'ultrapassament.

### 1.3. UBICACIÓ DEL PORT

El port de Cala Ratjada està situat a la punta més al est de l'illa de Mallorca, just a la badia de Capdepera, entre la punta del Cap Vermell i el Cap de Capdepera. Construït de nord a sud, més resguardat pel Cap de Capdepera a la zona nord. Aquest port es veu exposat als vents i temporals que van des de les direccions del Est-nord-est (ENE) fins al Sud (S).





Fig. 1. Mapa situació de la zona d'estudi. (Font: Google Maps)

L'ubicació d'aquest port és important pel conjunt de l'illa de Mallorca per dos motius.

En primer lloc, és el port més proper i amb la ruta més directe amb l'illa de Menorca. Des del port la distància entre illes és la mínima possible, només 20 milles nàutiques. Aquest fet fa que el possible transport en vaixell sigui més rentable tant per temps com per diners. Actualment el vaixell que cobria aquesta ruta no està en funcionament per insuficiència d'espai per part del port. Anteriorment, aquesta ruta estava coberta per embarcacions comercials de menor mida, on només admeten passatge a peu. La competència en aquest aspecte és molt forta amb el port d'Alcúdia, qui pot oferir vaixells de majors dimensions capaços de portar a major gent i transport rodat. Amb una ampliació o millora de l'actual port de Cala Ratjada es podria ser més competent en aquest camp.

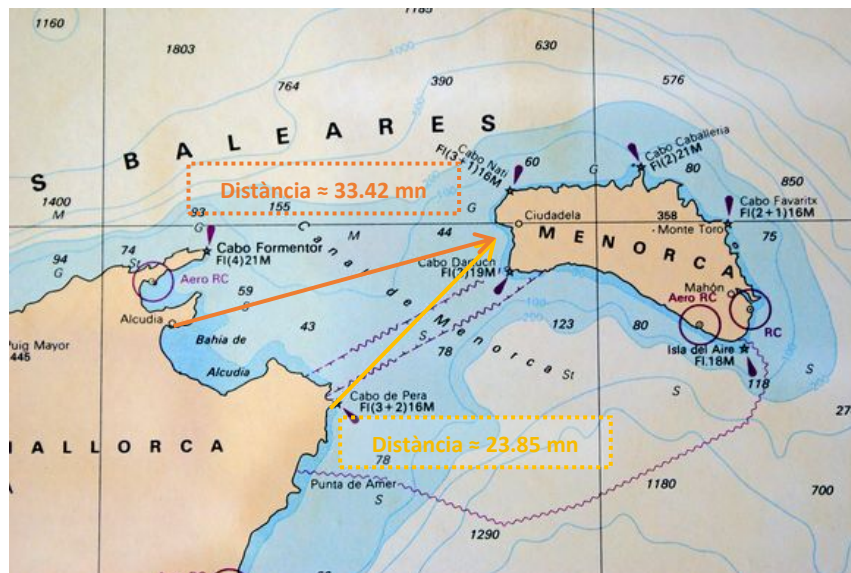
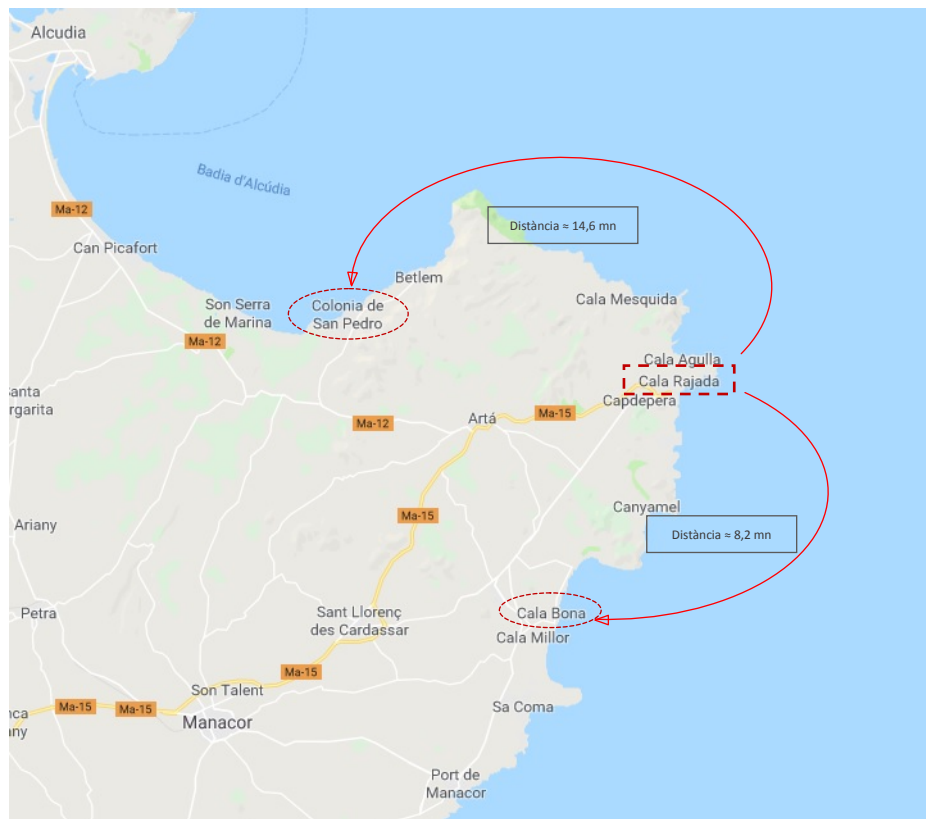


Fig. 2. Mapa situació. Comparativa distàncies diferents ports entre Mallorca i Menorca.(font: Google imatges).

En segon lloc, destaca la seva ubicació just a sobre la punta est de l'illa, quedant a resguard del nord. Això implica que pot oferir atenció, seguretat i resguard per aquelles embarcacions que es vegin afectades pel temporal de tramuntana, que justament és la principal direcció que es sol donar per l'illa de Mallorca. Aproximadament més del 65% dels temporals que es donen durant l'any provenen de vents del nord. A més, si observem la costa de llevant, des del Cap de Capdepera fins al port d'Alcúdia, una embarcació que està a mig camí entre aquest interval i es veu afectat per un temporal de nord, només podrà trobar resguard al port d'Alcúdia o al port de Cala Ratjada. Això es tradueix en oferir resguard a 10 milles de costa marítima a una zona de trànsit elevat (Canal entre Mallorca i Menorca). Aquestes 10 milles cal sumar-l'hi totes les embarcacions que ja es trobin mig camí de tornada de l'illa de Menorca, o a la inversa, es troben de camí a l'illa de Menorca. Això es tradueix en 10.5 milles nàutiques. Per tant, aquest port, per la seva ubicació hauria de poder donar resguard a les embarcacions a un aproximat de 50 milles nàutiques quadrades.

A més a més, observant detingudament la seva ubicació en una carta nàutica en relació els ports més propers, trobem que es troba a 7.6 milles nàutiques del port de Cala Bona al Sud, i a 15 milles nàutiques del port de la Colònia de san Pere, dins de la badia d'Alcúdia. Tots 3 ports de categoria similar, però que els serveis que ofereix tant el port com la mateixa població són molt diferents entre ells. I es podria dir que en aquest cas, el port de Cala Ratjada destaca en aquests aspectes. Això comporta que sigui un port a tenir en compte per a qualsevol embarcació que estigui de trànsit, tant sigui per qüestions turístiques com per qüestions de abastiment .



*Fig. 3. Mapa situació. Comparativa amb els ports propers. (Font: Google Maps)*

Per finalitzar, és important parlar i aturar-se a veure les característiques corresponents a la localitat de Cala Ratjada. Situada al extrem nord est de l'illa, es situa a més de 80 kilòmetres de la capital de l'illa, Palma de Mallorca. En el seu origen, durant els primers anys del segle XX, Cala Ratjada només era un petit barri per els pescadors i les pescadores del municipi principal Capdepera. Amb el creixement econòmic, el turisme comença a créixer de manera considerada a parit dels anys 60' a l'illa de Mallorca. Per tota l'illa el turisme agafa una importància destacada, i passa ser amb els anys el principal sector econòmic. Any rere any l'illa rep una major quantitat de turistes. Per aquells que s'aventuren i es poden permetre el luxe de viatjar per tota l'illa, per unes carreteres en males condicions, acaben per descobrir el barri de Cala Ratjada.

Aquesta localitat, en el moment de creixement turístic, ofereix un fàcil accés al port, una gran quantitat de terreny i de costa completament verge i uns terrenys completament per explotar. Amb aquestes característiques, el que es dona freqüent és el turista repetidor, i que aprofitant la seva novetat, adquireixen una propietat a la mateixa localitat. Les millores en les carreteres, el port i de les instal·lacions del mateix barri, porten a començar una dinàmica constant de creixement del turisme.

En l'actualitat, Cala Ratjada encara forma part de Capdepera com una entitat descentralitzada i amb auto gestió. D'altra banda, a títol insular, és una de les principals destinacions del turisme que ve a la illa de Mallorca, on sobretot destacaríem el turisme alemany. Segons el cens, i viuen prop més de 6000 habitants, però en temporada alta, durant els mesos de juliol a setembre, la població residint a la localitat ronda els 20000.

#### **1.4. ANTECEDENTS**

Per entendre l'existència del port de Cala Ratjada, i així comprendre l'origen dels problemes que presenta, cal aturar-se a observar el passat i el rerefons històric d'aquest port. Com s'ha comentat anteriorment, els problemes d'ultrapassament i funcionalitat en aquest port s'han donat al llarg de la seva existència.

L'inici del port de Cala Ratjada sorgeix com un petit port pesquer de la localitat de Capdepera. Capdepera és una petita localitat situada a menys de 2 kilòmetres de la costa i que esdevé la localitat més a l'est de tota l'illa. La seva proximitat a la costa, i la poca competència al no tenir altres localitats a prop, porten a tenir un bon sector pesquer. El creixement d'aquest sector porta a crear un petit barri de pescadors a tocar de la costa, situant-se a la zona nord de la badia, resguardant-se del forts vents de tramuntana. Aquest barri neix com el barri de Cala Ratjada. Per aquell moment, el barri de Cala Ratjada comptava amb les instal·lacions mínimes per a poder realitzar les activitats pesqueres amb facilitat, com es un petit moll, una rampa empedrada per a baixar barques, i com a resguard comptaven amb el refugi propi de la pròpia badia de Capdepera.



*Fig. 4. Port de Cala Ratjada abans del primer dic d'abric vista Sud - Nord. (Arxiu històric Cadepera)*

El 1917 es concedeix al port de Cala Ratjada la qualificació de port de refugi segons la llei estatal, el que porta més endavant, al 1922, començar a redactar un avantprojecte d'una nova infraestructura de protecció. Tot i així, no és fins el 1930 que l'administració de l'Estat redacta un projecte de refugi per embarcacions menors per al port de Cala Ratjada. A partir del 1933 es comencen les obres de construcció del dic d'abric, però a causa de diversos problemes no s'aconsegueix acabar les obres correctament.



*Fig. 5. Cala Ratjada, primeres obres del dic extern. Vista Nord -Sud. (Arxiu històric Cadepera)*

Per tant, al 1940 es redacta un nou projecte de refugi, el qual si que es finalitzen les obres proposades al 1949, després de dos reformes molt importants. Una d'aquestes reformes es deu a un gran temporal al 1945, que va causar una gran pèrdua material, creant un forat en el longitudinal de l'estructura de 25 metres de llarg. La finalització de les obres comporta l'haver construït un dic d'abric de 145 metres de tipologia mixta, amb una superestructura amb cota de coronació als 6 metres d'alçada. Aquesta obra comporta un augment en la seguretat de les activitats que es realitzen al port, tant d'oci com econòmiques. I alhora, es genera un espai per a instal·lacions que potenciarà el sector pesquer.



*Fig. 6. Port Cala Ratjada, primer alineació en dic compost. (Arxiu històric Cadepera)*

A partir d'aquest moment l'interès pel port de Cala Ratjada i el seu potencial augmenten. El bon rendiment del sector pesquer per una banda, i el creixement del turisme, atret per una zona verge, natural i amb possibilitats d'explotació, la demanda de amarratges del port creix exponencialment. Donada aquesta situació, el 1964 s'inicia el redactat del Projecte de Millora del Abric del Port de Cala Ratjada per part de l'administració. Al 1967 s'inicien les obres d'ampliació del dic d'abric, prolongant el ja existent, 140 metres direcció sud. Però, en aquesta ampliació es varia la tipologia de dic, i es construeix un dic vertical, de caràcter reflectant. Durant aquestes obres, també s'aprofita per realimentar i fer créixer la protecció de l'alineació ja existent. Aquesta millora consisteix en ampliar la berma exterior ja existent,



dotant-la d'una major amplada. I alhora, incorpora alguns blocs de formigó de 2x2x4 metres, just a la part superior de la berma, a l'inici del talús.

Durant les obres, i després de la seva finalització al 1971, es segueixen produint problemes tant estructurals com de disseny per ultrapassament. Ja a l'inici del 1971, just finalitzades les obres, es detecten problemes d'enfonsaments al llarg de la tercera alineació. Aquest problema ve donat per la gran acumulació d'energia que es concentra a l'angle obtús entre la segona i la tercera alineació, causat per ser una alineació semi reflectant i l'altre reflectant completament. Per a solucionar tal problema s'aboquen fins a 55 blocs de 22 tones (2x2x2.5m), amb la intenció de crear un talús que absorbeixi aquesta energia.



*Fig. 7. Destrossa del dic exterior per causa d'un temporal durant les obres. (Arxiu històric Capdepera)*

Poc més tard, al 1973 es registren uns grans temporals, com el que es destaca al 22 de març d'aquest any, on es produeixen un important ultrapassament, degut a una cota de coronació insuficient. Aquest ultrapassament ve donat en gran part, per no haver considerat la creixuda de l'alçada d'ona incident per efecte de la reflexió. Amb la nova alineació la reflexió de l'onada incident és completa la gran majoria de vegades, i per això augmenta considerablement els valors d'alçada d'ona. Un segon càlcul considerant aquesta reflexió determina fer un recreixement del mur exterior d'un metre d'alçada.

Els temporals es van succeint i les problemàtiques amb ultrapassament també. Gairebé anualment es registren temporals que generen un ultrapassament considerable, afectant als serveis propis del port, i posant en risc als possibles usuaris. Situació no acceptable, i que obliga constantment a reforçar i reparar el dic exterior.

L'últim succés a destacar va ser la destrossa del mur de la segona alineació durant el temporal del 21 de febrer de 2017. En aquest temporal el mur es va arribar a trencar per complet, deixant un forat de 9 metres quadrats a nivell de mar. El dic en trencar-se va llençar les restes de mur a desenes de metres de distància, i deixava una obertura perquè les onades entressin completament dins del port, inundant per complet la zona de serveis. Per una llarga durada, fins que es completa la reparació, la zona de serveis afectada queda en mans de la meteorologia, i que per la zona referida, afecta directament a l'important sector pesquer .



*Fig. 8. Onada entrant pel forat ocasionat pel temporal del 21 de febrer del 2017. (Diari de Mallorca)*



*Fig. 9. Forat i altres desperfectes que es van produir pel temporal del 21 de febrer del 2017. (Diari de Mallorca)*

Es destaca la seva evolució al llarg de la història, doncs és en ella on es contemplen els nombrosos problemes que s'han anat produint al llarg de la seva existència, tant per estabilitat com per servei, i l'alta freqüència amb que s'han anat succeint. Cal destacar que són molt més notoris els problemes d'ultrapassament, per ser més freqüents que no pas els problemes estructurals. Però, no cal obviar que són tots dos problemes igual de importants, i que també es donen anualment temporals que posen en risc la estructura.

### **1.5. DESCRIPCIÓ DEL PORT**

En la actualitat, definiríem el port de Cala Ratjada com a port esportiu mitjà, qualificatiu que donem tenint en compte la resta de ports de l'illa. Posseeix un total de 215 amarratges disponibles de diferents mides, i 20 d'aquestes estan destinades pel moll de trànsit. La titularitat del port és de l'administració pública a través de l'entitat PORTS IB. Però, pel que fa als amarratges, la titularitat a la pràctica està dividida entre l'entitat política (Ports IB) i la entitat privada (Club Nàutic de Cala Ratjada). A més per la part privada del Club Nàutic, s'hi sumen 50 embarcacions petites que poden estar amb remolc a dic sec.

Originalment concebut com a port pesquer, en l'actualitat és combina tant les embarcacions dins del sector de la pesca com les embarcacions destinades a l'oci. Cal destacar que si durant l'any, temporada fora d'estiu, els principals usuaris del port són del sector de la pesca, un cop arriba la temporada d'estiu els amarratges d'oci són els més desitjats.

Tot i ser un port relativament petit, conté un bon nombre d'instal·lacions. En primer lloc, consta d'una gasolinera per a embarcacions de tot tipus, a l'inici de la tercera alineació. En aquesta mateixa zona, trobem un petit restaurant/bar i les oficines dels serveis de turisme que ofereix el mateix port. Al llarg de la segona alineació, dins del mateix mur, trobem les instal·lacions auxiliars per al restaurant, els pescadors, i sobretot per a tots aquells tripulants de les embarcacions de trànsit. Si anem a l'inici de la primera alineació, a l'origen del port de Cala Ratjada, trobem la llotja dels pescadors i petits trasters per als pescadors amb embarcacions menors, així com l'oficina de Ports IB. Continuant per la costa, trobarem la caseta de la Guardia Civil. Entre la oficina i la Guardia Civil, hi ha una rampa d'accés per a embarcacions a remolc de domini públic. La segona rampa que trobem al port és de domini privat, per aquells usuaris amb una plaça dins del dic sec que ofereix el Club Nàutic, i que està equipat amb maquinaria auxiliar per a facilitar les operacions de baixada i pujada de la barca. Per últim, dins del club Nàutic a la zona més externa del moll interior, trobem un segon dic sec exclusiu per a reparacions o per una estància temporal per a efectuar qualsevol altre operació a la barca. Aquest espai està dotat d'una grua amb capacitat per aixecar embarcacions de fins a 20 tones.

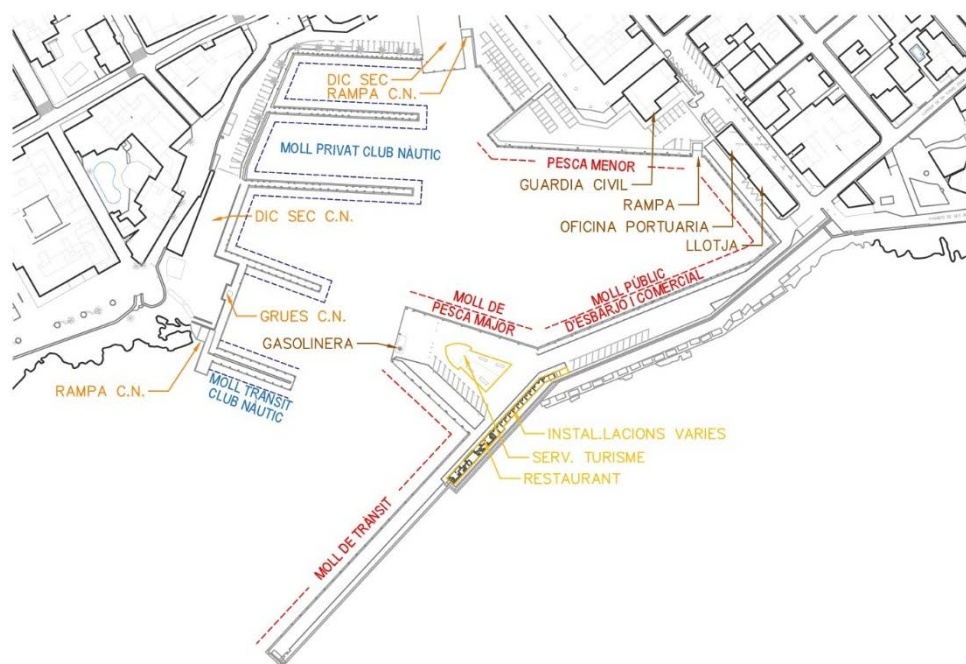


Fig. 10. Esquema d'instal·lacions i serveis al port. (Plànol AutoCAD).

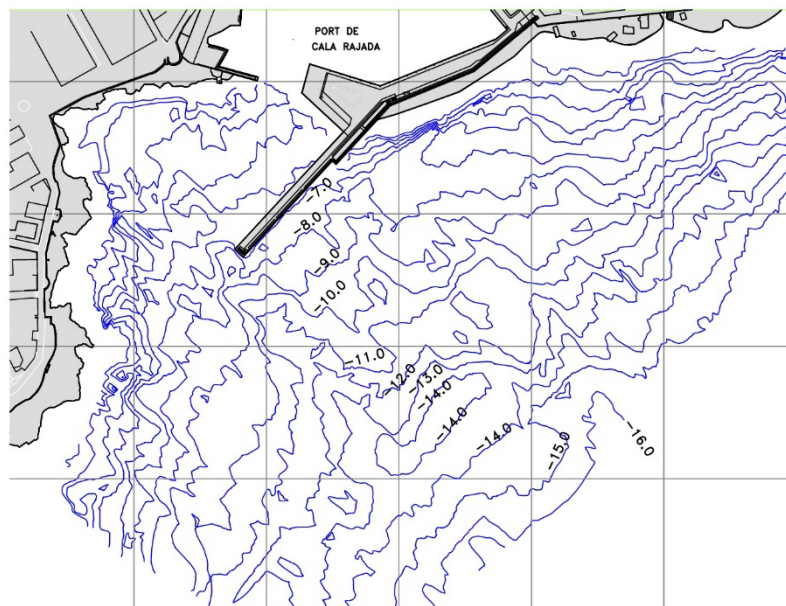
#### 1.5.1. BATIMETRIA I GEOLOGIA

A continuació es descriu breument les característiques geològiques i morfològiques de la zona d'estudi.

Pel que fa a la característica geològica, tot el dic exterior del port de Cala Ratjada està recolzat sobre una base de pedra. A la zona més immediata al exterior del port segueix sent una base de pedra i posidònia. Però ràpidament es comença a mesclar amb unes extenses zones de sorra. Principalment, la roca garanteix major seguretat al assentament dels blocs dels dic verticals, igual que dels dics en talús. Però per contra la base de roca es considera indeformable, i per tant, el fons marí sempre es manté a la mateixa profunditat i en pendent constant. Una de les avantatges de la sorra, és la seva capacitat de modificar el perfil del fons marí per a que les onades dissipin l'energia més progressivament. Per aquest cas, les onades en arribar sempre creixeran en la mateixa zona i de la mateixa manera, i per tant la possibilitat de tenir onades grosses és alta.

Ara observant la batimetria característica que es dona per aquesta zona, trobem que els pendents que es donen són considerablement molt baixos. Tal com s'ha comentat ens trobem en una zona, fora del dic, on es mescla una zona de sorra amb una zona de pedra. Les zones de sorra ens indiquen que els pendents són baixos, la sorra es un element que es mou i es col·loca segons una millor estabilitat. Com en aigües mitges l'onada no afecta gairebé al fons marí aquests pendents solen ser suaus i baixos. En canvi per a les zones de roques es poden donar pendents de tot tipus, des de zones molt planes fins als talussos gairebé vertical. Un clar exemple és la costa de la Serra de Tramuntana, a Mallorca mateix.

Alhora el fet que el port es trobi en una badia, també indueix a pensar que majoritàriament els pendents seran baixos. A més si observem tota la badia, des de Es Carregador fins a Cala Gat, en els primers 50 metres el pendent es prou baix.



*Fig. 11. Batimetria de 2004. Isòbates cada 1 metre. (Plànol AutoCAD).*

Observem la zona d'estudi i aquesta característica es compleix. Podem observar en una batimetria realitzada el novembre del 2004, que bàsicament des de peu d'estructura de qualsevol punt del dic exterior el pendent es manté aproximadament igual, entre el 2% i el 4%. Aquests pendents es consideren com a pendents suaus, típics d'una platja de sorra prou fina.



### 1.5.2. GEOMETRIA DEL PORT

En el següent apartat es detallen les característiques geomètriques de l'àmbit d'estudi del present projecte. Donat que el principal objectiu del projecte és l'estudi de l'ultrapassament, la geometria rellevant en aquest cas es la del dic exterior. El port de Cala Rajada es característic per estar format per dics amb tipologies diferents i amb una constant variació dels detalls geomètrics dels seus perfils.

Donada aquesta diferència al llarg del dic exterior, aquest s'ha dividit en diferents trams. Aquesta divisió està formada per 3 alineacions diferents. S'han diferenciat aquestes per similitud de característiques. Aquells perfils consecutius entre ells i que tenen la mateixa secció o equivalent, s'han agrupat dins la mateixa alineació. Es descriuen a continuació cada una de les alineacions numerant-les de sud a nord.

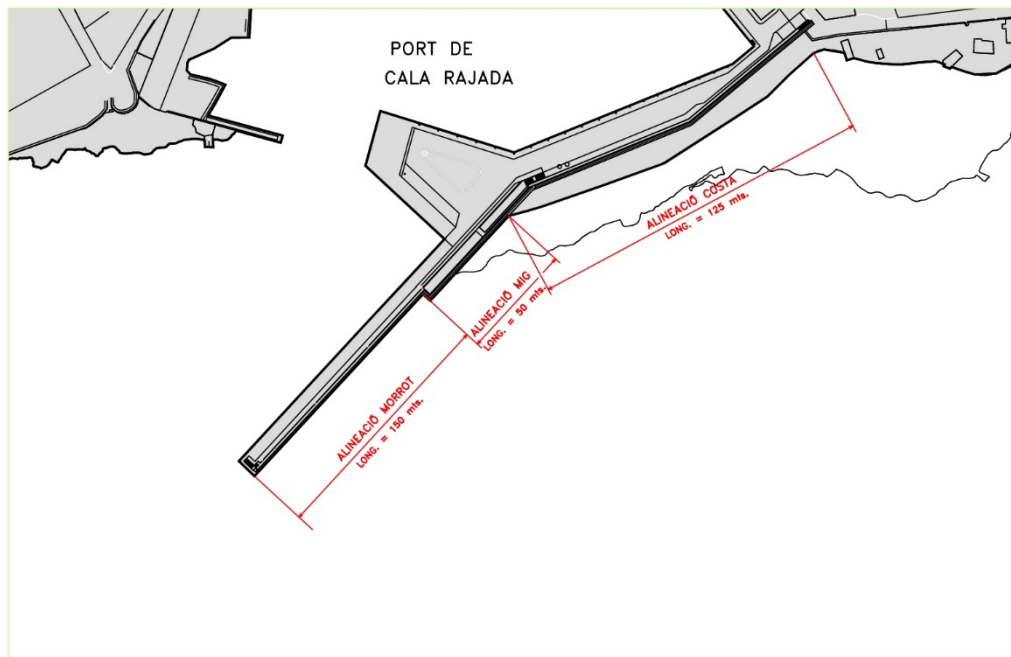


Fig. 12. Esquema en planta del dic exterior. (Plànol AutoCAD).

#### 1.5.2.1 ALINEACIÓ MORROT.

Definim aquesta alineació com a morrot per ser la que conté el morrot del dic exterior. Aquesta és l'última alineació que es va construir, i es va fer amb la intenció de ampliar la capacitat del port per a embarcacions de trànsit. És el dic amb el perfil més esvelt, ja que no conté gairebé cap instal·lació, els suficients per a donar un servei mínim. A continuació es llisten les seves característiques.

- Tipologia: **Vertical/Reflectant.**
- Longitud de l'alineació: **100 metres.**
- Amplada del dic: **9 metres.**
- Cota de coronació del dic: **7 metres.**
- Profunditat del peu d'estructura: **entre 8 i 8.5 metres.**
- Característiques de construcció: **de blocs de formigó submergits i sobre fons marí.**

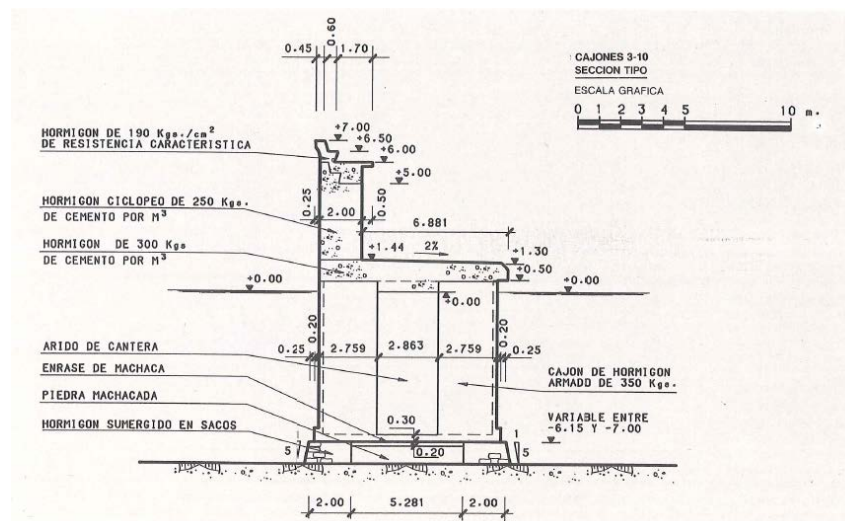


Fig. 13. Esquema del perfil transversal per la alineació MORROT. Dic vertical. (Font: Ports IB).

### 1.5.2.2 ALINEACIÓ MIG.

Denominada amb aquest nom per que es troba en la transició entre les dos tipologies de dics existents, i per tant la seva geometria és característica i canviant. A continuació es llisten les seves característiques. Com es mostra a les figures, la secció mig està definida per dos tipus de seccions (Secció 1 i secció 2).

- Tipologia: **Majoritàriament Vertical/Reflectant.**
- Longitud de l'alineació: **50 metres.**
- Amplada del dic: **8.5 metres tot el conjunt del mur.**
- Cota de coronació del dic: **7 metres.**
- Profunditat del peu d'estructura: **entre 7.5 i 5.5 metres.**
- Característiques de construcció: **de blocs de formigó submergits amb sorra. Assentat sobre pedraplè o berma de escullera.**

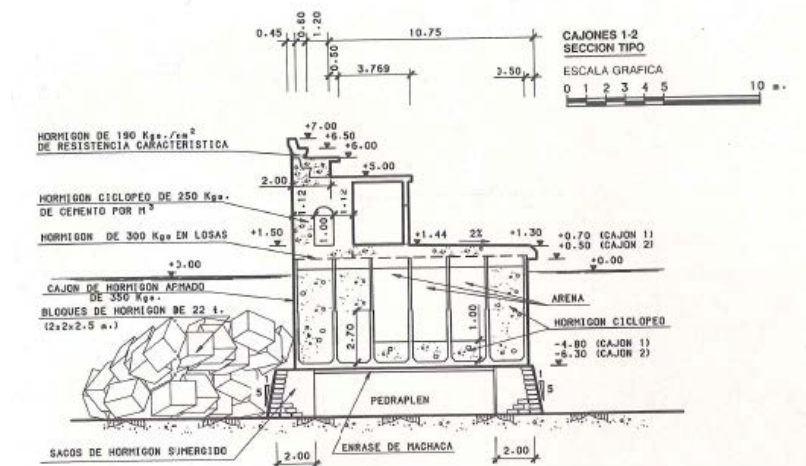


Fig. 13. Esquema del perfil transversal per la alineació MIG. Dic vertical amb protecció amb escullera.

(Font: Ports IB).

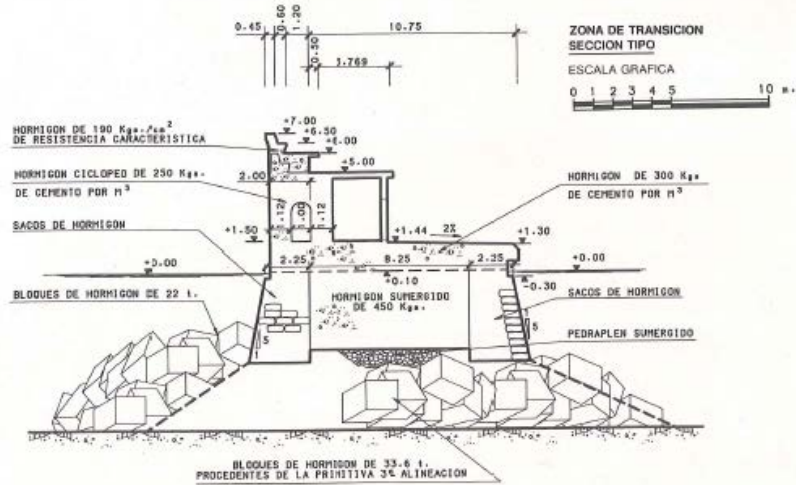


Fig. 14. Esquema del perfil transversal per la alineació MIG. Dic compost amb berma submergida. (Font: Ports IB).

### E.2.2. Alineació COSTA.

Anomenada de la costa per ser la alineació primera des de la costa. És l'inici del dic i per tant la primera infraestructura de protecció que es va construir en aquest port. Esta situada en una zona molt més resguardada i genera un angle obert amb la costa. . A continuació es llisten les seves característiques.

- Tipologia: **Dic en talús.**
- Longitud de l'alineació: **125 metres.**
- Amplada del dic: **23 metres des d'inici berma fins a moll d'amarratge..**
- Cota de coronació del dic: **6 metres.**
- Profunditat del peu d'estructura: **entre 5 i 4 metres.**
- Característiques de construcció: **berma formada per 3 blocs de formigó de 2x2x4. Mur de protecció a cota de berma. Mantell principal d'escullera natural amb un sol filtre d'escullera més lleugera.**

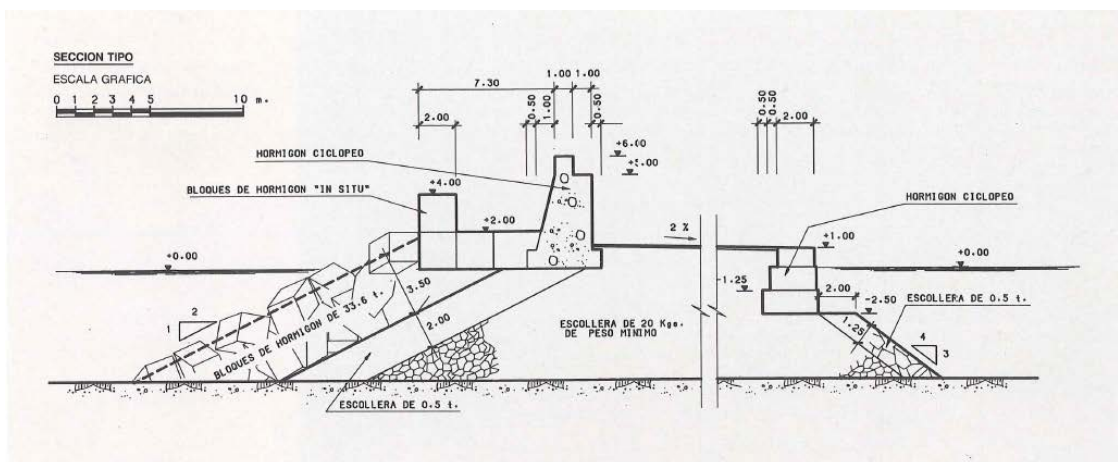


Fig. 15. Esquema del perfil transversal per la alineació COSTA. Dic en talús. (Font: Ports IB).



## 2. ANÀLISI

### 2.1. PROCEDIMENT D'ANÀLISIS

A continuació es vol exposar el procés que s'ha seguit per elaborar els càlculs per a fer l'anàlisi de l'estat actual del port. El objectiu principal és el de calcular el cabal d'ultrapassament que es produeix durant períodes de temporal. Per això s'ha volgut representar la simulació d'enviar un temporal durant un temps determinat, calcular l'alçada dona que s'obté a peu d'estructura i posteriorment calcular el cabal d'ultrapassament que es pot donar.

S'han distingit 3 processos per a definir tot el procediment d'anàlisi.

- I. Clima marítim. Per a obtenir les dades característiques per a definir el nostre onatge determinat, a partir de dades registrades i resultats reals. Així d'aquesta manera generar un temporal representatiu per poder fer la nostra simulació.
- II. Propagació. Enviar un temporal característic des d'un punt determinat amb una certa direcció i veure quin és el seu comportament i en quin estat arriba a peu d'estructura.
- III. Cabal d'ultrapassament. Segons els valors d'alçada d'on obtinguts en la propagació, calcular quin és el cabal d'ultrapassament que s'obté en l'estat actual, que és objecte principal d'aquest document.

### 2.2. CLIMA MARÍTIM

A partir de l'anàlisi del clima marítim, es poden obtenir els paràmetres característics (període, alçada d'ona i direcció) que definiran el tipus d'onatge determinat per a cada zona. Analitzant aquestes dades podem obtenir els valors d'onatge determinants per a realitzar l'estudi del port.

#### Fonts d'obtenció de dades

Per a obtenir aquests paràmetres s'estudien valors reals que s'obtenen del comportament del mar, i mitjançant càlculs probabilístics, parametritzar aquest comportament segon la zona on ens trobem. Segons la zona on ens trobem els tres paràmetres principals poden ser completament diferents.

Hi ha 3 bases de dades principals per a fomentar els estudis de parametrització del mar.

- I. Dades instrumentals. Mitjançant aparells sensors, normalment boies d'onatge, s'obtenen dades de període i alçada d'ona, en el cas de les boies escalars; i dades de període, alçada i direcció de l'ona per les boies direccionals. Aquestes dades s'agrupen a la xarxa REMRO (*Puertos del Estado*). La avantatge d'aquestes dades es la seva qualitat i precisió, donat que són resultats reals de l'estat del mar.
- II. Dades visuals. Formen un gran conjunt de dades. S'obtenen a partir del registre d'observacions que fan vaixells en ruta de l'estat del mar (*World Meteorological*

Office), i que registren la direcció, el període i l'alçada d'ona del punt en el que es troben. Per altre banda, també es defineix el tipus d'ona, si es de tipologia *Swell* o be tipus *Sea*. Aquestes dades són molt nombroses però poden resultar no fiables.

- III. Dades per models numèrics. A partir de l'estat meteorològic i de resultats reals de l'estat del mar, es fan prediccions del comportament marítim a partir de formulacions numèriques. Les xares de punts WANNA O SIMAR, son dos exemples d'aquesta base de dades. La avantatge és l'obtenció d'una xarxa extensa que defineix diferents punts del mar, però la seva fiabilitat dependrà de calibrar correctament cada formulació. Donat que es basa en càlculs probabilístics, es treballa sempre sobre un cert marge d'error.

### 2.2.1. CLIMA MIG

A partir de l'estudi del clima mig es pot determinar el comportament del mar més freqüent en un punt donat. S'analitza les dades obtingudes durant un any i es determina els paràmetres de l'onatge fixant un valor de no excedència per a una distribució de tipus Weibull. Dins d'un estudi de clima mig es pot trobar la caracterització de l'alçada d'ona pel regim mig. La distribució direccional probabilística a partir de les roses d'onatge. I la relació habitual entre paràmetres determinants segons unes taules.

Per l'objecte d'aquest projecte s'han utilitzat els estudis de clima mig pertanyents a les dades registrades a la boia més propera a la zona d'anàlisi, que en aquest cas es la boia de Capdepera. Les dades d'aquesta boia són suficientment significants donat que compon el registre de dades d'un període de 23 anys (1989 – 2012).

En el present estudi, s'ha utilitzat el clima mig per a calcular els valors dels coeficients de direccionalitat. Donat que no es trobaven valors d'aquests coeficients representatius s'ha hagut de recorre a dades del clima mig.

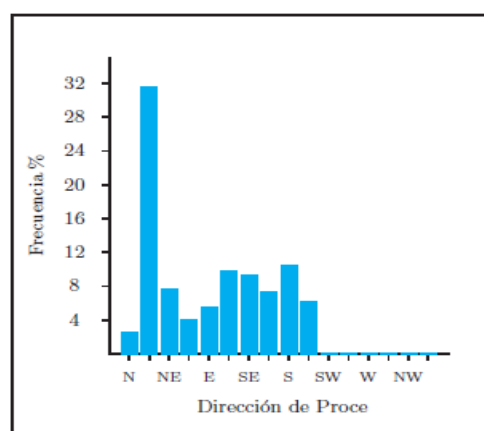
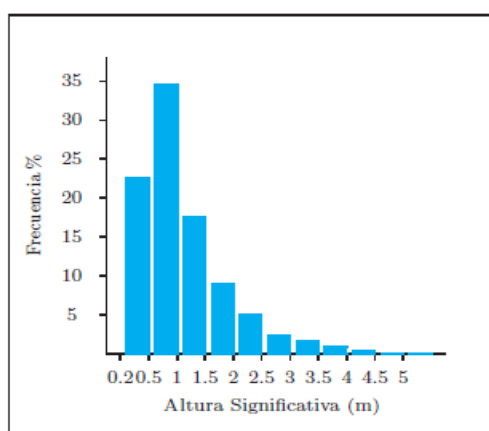
#### DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE DIRECCIÓN Y ALTURA SIGNIFICATIVA

LUGAR : Boia de Capdepera

PERIODO : Anual

CRITERIO DE DIRECCIONES: Procedencia

SERIE ANALIZADA : Abr. 2010 - Abr. 2014



Font: Informe de boia de Puertos del Estado.

A l'hora de calcular la propagació d'un onatge determinat s'ha de tenir en compte els coeficients de direccionalitat. Aquests coeficients defineixen una reducció de l'alçada d'ona en funció de la freqüència d'ones segons direcció. Els valors d'aquest coeficient varien entre 0 i 1. De tal manera que aquelles direccions que presentin un major nombre d'ones per un conjunt determinat, tindran un factor de reducció menor i per tant el seu coeficient serà més pròxim a 1. A continuació s'explica detalladament el procediment seguit per a trobar els valors d'aquest coeficients. En primer lloc, la base de dades inicials s'extreu de l'informe de clima mig referent a la boia de Capdepera que es pot trobar a la pàgina de *Puertos del Estado*. D'allí ens fixarem en les següents taules i gràfiques.

Aquestes gràfiques s'observa de manera quantitativa els valors d'alçada d'ona significativa que es donen durant un any (*primera gràfica*), i la quantitat en % d'onades per cada sector direccional (*segona gràfica*). Cada sector direccional correspon a una diferència de 22,5 graus. Amb aquestes gràfiques es pot tenir una idea visual de quina és la situació més freqüent en la zona d'estudi, tant pel que fa a la direcció com al referent a les alçades

Tabla Altura Significativa (Hs) - Dirección de Procedencia en %

Dirección	Hs (m)												Total
	≤ 0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	> 5.0	
CALMAS	6.495												6.495
N 0.0		.170	.697	.813	.402	.188	.071	.036	-	-	-	-	2.376
NNE 22.5		2.627	8.228	7.621	5.325	3.592	1.966	1.224	.599	.357	.054	.009	31.600
NE 45.0		2.278	3.538	1.054	.348	.089	.027	.018	-	-	-	-	7.353
ENE 67.5		1.510	1.671	.411	.286	.098	.054	-	-	-	-	-	4.029
E 90.0		1.912	1.546	.831	.482	.322	.197	.071	-	-	-	-	5.360
ESE 112.5		2.752	3.502	1.546	.876	.491	.071	.098	.116	.018	-	-	9.470
SE 135.0		4.145	3.788	1.027	.295	.071	.009	.009	-	-	-	-	9.345
SSE 157.5		3.609	2.832	.706	.036	.018	-	-	-	-	-	-	7.201
S 180.0		3.011	5.602	1.421	.268	.063	-	-	-	-	-	-	10.364
SSW 202.5		.608	2.939	1.849	.411	.107	.018	-	-	-	-	-	5.932
SW 225.0		.027	.063	.063	-	-	-	-	-	-	-	-	.152
WSW 247.5		-	.054	.027	.009	-	-	-	-	-	-	-	.089
W 270.0		-	.018	.036	.018	-	-	-	-	-	-	-	.071
WNW 292.5		-	.009	.009	-	-	-	-	-	-	-	-	.018
NW 315.0		-	.027	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.027
NNW 337.5		-	.045	.071	-	-	-	-	-	-	-	-	.116
Total	6.495	22.648	34.557	17.484	8.755	5.039	2.412	1.456	.715	.375	.054	.009	100 %

Font: Informe de boia de Puertos del Estado.

d'ona.

La taula 1 representa el tant per cent d'onades segons alçada i sector direccional en el transcurs d'un any. Aquesta taula serà la base per a realitzar els càlculs dels coeficients de direccionalitat dels sectors.

En primer lloc es parteix de la taula anterior per a elaborar una segona taula amb els tants per cent acumulat. Segons cada sector, es calcula un nou tant per cent per cada interval d'alçada d'ona corresponent a la suma de la resta de tant per cents anteriors, aquesta suma es compara amb el total de tant per cent que correspon a cada sector. Aquesta acumulació començarà des de l'alçada d'ona més petita fins la més alta. De manera que per l'interval



d'alçada d'ona més elevat de cada sector registrat tindrà el 100 per cent de l'acumulat. El càlcul d'aquest nou tant per cent seguiria la següent fórmula.

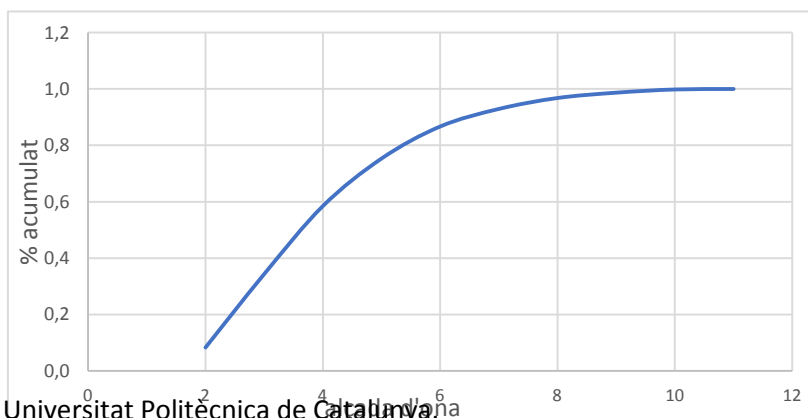
Aquesta fórmula descriu quin serà tant per cent acumulat de cada interval, i per cada sector, podem trobar que aquests valors van des del 0 fins a l'1.

SECTORS		INTERVALS (metres)										
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
N	0	0.072	0.365	0.707	0.876	0.955	0.985	1	1	1	1	1
NNE	22.5	0.083	0.343	0.585	0.753	0.867	0.929	0.968	0.987	0.998	1	1
NE	45	0.310	0.791	0.934	0.982	0.994	0.998	1	1	1	1	1
ENE	67.5	0.375	0.789	0.891	0.962	0.987	1	1	1	1	1	1
E	90	0.357	0.645	0.800	0.890	0.950	0.987	1	1	1	1	1
ESE	112.5	0.291	0.660	0.824	0.916	0.968	0.976	0.986	0.998	1	1	1
SE	135	0.444	0.849	0.959	0.990	0.998	0.999	1	1	1	1	1
SSE	157.5	0.501	0.894	0.993	0.998	1	1	1	1	1	1	1
S	180	0.290	0.831	0.968	0.994	1	1	1	1	1	1	1
SSW	202.5	0.102	0.598	0.910	0.979	0.997	1	1	1	1	1	1
SW	225	0.176	0.588	1	1	1	1	1	1	1	1	1
WSW	247.5	0	0.6	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1
W	270	0	0.25	0.75	1	1	1	1	1	1	1	1
WNW	292.5	0	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NW	315	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NNW	337.5	0	0.388	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Taula 1. Taula de tant per cent acumulat segons direcció i alçada d'ona

La taula mostrada resumeix els tant per cents acumulats sobre 1, calculats a partir de la primera taula. Ja es pot veure, igual que amb les gràfiques inicials, que per les direccions NNE i ESE hi haurà valors del coeficient de direccionalitat més elevats.

El segon pas és calcular l'alçada d'ona corresponent al 99% i al 99,9% acumulat per cada sector. D'aquesta manera és té en compte la importància en l'alçada d'ona. Es a dir, en el moment de planificar una obra o estudi de costa, no només serà rellevant la direcció de l'onatge més freqüent, sinó que serà important la combinació entre l'alçada d'ona i la



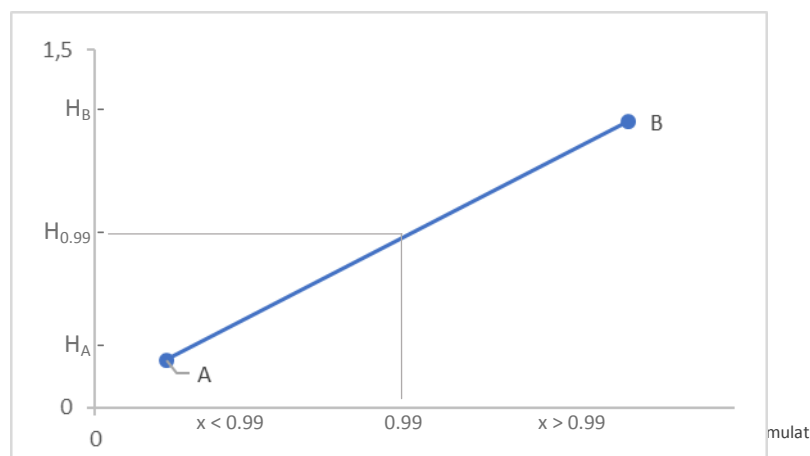


direcció d'aquest onatge.

Es definiran dos alçades d'ona per cada sector. L'alçada d'ona que correspon al 0.99 sobre 1 ( $H_{0.99}$ ) i l'alçada d'ona corresponen al 0.999 sobre 1 ( $H_{0.999}$ ). El comportament de la funció acumulada segons cada sector és de tipus quadràtica tal com es pot veure a la figura. Tal com s'ha dit anteriorment, per aquells sectors on la majoria de pes estigui per alçades d'ona baixes, es probable que el resultat del coeficient sigui baix.

Per fer el càlcul de les alçades d'ona corresponents podem suposar que entre els intervals que engloben els tant per cents desitjats, es poden simplificar com a una recta, donat que ens trobem al extrem final de la funció quadràtica. En aquesta cas trobarem els valors d'alçada d'ona mitjançant interpolació a partir de la recta definida entre els intervals.

*Gràfica 1. Representació % acumulat versus alçada d'ona.*



*Gràfica 2. Explicació gràfica de la interpolació entre  $H_{0.99}$  i  $H_{0.999}$ .*

Tenint de referència els punts A i B, trobarem els valors  $H_{0.99}$  i  $H_{0.999}$  a partir de la fórmula (), que representa el càlcul de la recta entre aquests dos punts per un tant per cent determinat, en aquest cas 0.99 i 0.999.

Per acabar el càlcul del coeficient de direccionalitat, es calcularà la mitja entre els dos valors obtinguts anteriorment. Aquesta mitja serà el valor de referència pel càlcul del coeficient. Per cada sector s'haurà obtingut un valor de la mitja concret. Per aquest projecte s'ha limitat el coeficient mínim a un valor concret, donat que per coeficients molt baixos, el resultat final en el càlcul de la propagació pot no ser representatiu, generant alçades d'ona molt menors. Així doncs, s'ha fixat un valor mínim per  $K_\alpha$  igual a 0.45.

Finalment per obtenir el coeficient de direccionalitat, es dividirà el valor de la mitja de cada sector per la mitja més elevada que s'hagi obtingut. D'aquesta manera el sector amb el valor de la mitja més elevat obtindrà  $K_\alpha = 1$ .

En cas que el valor de  $K_\alpha$  sigui menor a 0.45 després d'efectuar aquest primer càlcul, automàticament passarà a ser  $K_\alpha (\min) = 0.45$ . A continuació es tornarà a fer el càlcul del coeficient de direccionalitat a partir d'una distribució proporcional entre 0.45 i 1, tenint aquest dos com els valors mitjos mínims i màxims com a referència.

COEFICIENTES DE DIR. GRAL.				
	H_99	H_999	H_m	K_alpha
N	3.16986	3.467	3.3184	0.74268
NNE	4.14563	4.7907	4.4682	1
NE	2.33978	3.2958	2.8178	0.63063
ENE	2.62685	2.9627	2.7948	0.62548
E	3.12246	3.4622	3.2924	0.73685
ESE	3.6694	4.2369	3.9532	0.88474
SE	1.99247	2.9809	2.4867	0.55653
SSE	1.48725	2.3	1.8936	0.4238
S	1.92416	2.4177	2.1709	0.48587
SSW	2.30692	2.8352	2.5711	0.57542
SW	1.48786	1.4988	1.4933	0.33421
WSW	1.95	1.995	1.9725	0.44146
W	1.98	1.998	1.989	0.44515
WNW	1.49	1.499	1.4945	0.33448
NW	0.995	0.9995	0.9973	0.22319
NNW	1.49183	1.4992	1.4955	0.3347

COEF.DIR. GRAL. LIMITAT AL MINIM					
	H_99	H_999	H_m	K_alpha	
N	3.1699	3.467	3.3184	0.81781	0.82
NNE	4.1456	4.7907	4.4682	1	1.00
NE	2.3398	3.2958	2.8178	0.73848	0.74
ENE	2.6269	2.9627	2.7948	0.73483	0.73
E	3.1225	3.4622	3.2924	0.81368	0.81
ESE	3.6694	4.2369	3.9532	0.91839	0.92
SE	1.9925	2.9809	2.4867	0.68601	0.69
SSE	1.4872	2.3	1.8936	0.59204	0.59
S	1.9242	2.4177	2.1709	0.63598	0.64
SSW	2.3069	2.8352	2.5711	0.69939	0.70
SW	1.4879	1.4988	1.4933	0.52861	0.53
WSW	1.95	1.995	1.9725	0.60454	0.60
W	1.98	1.998	1.989	0.60715	0.61
WNW	1.49	1.499	1.4945	0.52879	0.53
NW	0.995	0.9995	0.9973	0.45	0.45
NNW	1.4918	1.4992	1.4955	0.52895	0.53

A continuació s'exposen les taules resultats calculades pel present projecte.

Es pot veure en la primera taula els resultats corresponents al primer càlcul, on s'obtenen gairebé més del 50% de sectors amb un coeficient per sota del 0.45 limitat. Així doncs s'ha procedit a efectuar la limitació per valor mínim, obtenint els valors de la segona taula. En fons taronja estan subratllats els coeficients dels sectors que són objecte de càlcul per aquest projecte.

## 2.2.2. CLIMA EXTREM

Per garantir la seguretat i operativitat d'un port i les seves instal·lacions és necessari estudiar el clima extremal. Amb aquest estudi es pot conèixer quines són les situacions més extremes que pot patir un port donada una certa freqüència de temps.

A partir de registres dels successos més extrems podem extreure uns paràmetres d'onatge per definir el seu comportament. En general amb aquest estudi podem definir quina és la probabilitat de que es produeixi un temporal que superi un cert valor d'alçada d'ona. I així

Taula 1. Resultats dels coeficients de direccionalitat.

poder dimensionar i dissenyar el port per reduir possibles riscos amb onatges massa elevats.

Per aquest estudi, el clima extrem s'ha calculat mitjançant el mètode POT (Peak Over Threshold), o valors de temporal per sobre del llindar. Aquest mètode analitza els períodes de temporals que s'han produït i registrat. Es considera un temporal quan es supera una certa alçada d'ona, i la duració del temporal s'estableix per una durada mínima de 5 dies, es a dir, que per aquesta durada tots els registres realitzats es prendran dins del mateix fenomen. Aquesta definició permet regular els valors que es trien, de manera que a cada temporal s'analitzen totes les dades dins d'un mateix conjunt. La selecció de dades es realitza seguint el títol de mètode escollint aquelles dades per sobre d'un cert llindar. El llindar ve determinat per un procediment estadístic, segons tots els registres realitzats, i a partir de quin valor es considera un temporal.

En el present estudi, s'han analitzat les dades obtingudes a través de sensor, la boia de Capdepera i un dels punts SIMAR més proper a la boia de codi: 2126116. La boia de Capdepera va deixar de enregistrar dades el Maig de 2014, per tant en els darrers 4 anys no s'ha pogut obtenir cap dada d'aquesta boia. Tot i que el banc de dades que ofereix aquest sensor es prou generós per a que els seus resultats siguin representatius, s'ha volgut eixamplar la base de dades amb el punt SIMAR més proper a la boia.

La principal raó per a voler tenir una base de dades més actual resideix en el fet que en els darrers anys les problemàtiques per ultrapassament que ha sofert el port, han sigut molt més nombroses i habituals. Fins a causar el trencament del dic vertical al Gener del 2017. Per aquest motiu, s'ha volgut analitzar la necessitat de considerar més dades de les que la boia pot oferir. Els punts SIMAR contenen informació sobre l'estat del mar, a partir del càlcul amb models numèrics de dades atmosfèriques i oceàniques. El conjunt de punts SIMAR formen una malla que engloben tot el litoral espanyol. Per tant, són dades tractades amb ordinador, que parteixen de valors reals registrats, i que són calculats a partir d'aplicar resolució per mètodes numèrics.

Per aquest motiu, les dades que poden oferir els punts SIMAR no són tant precisos com els registrats per sensors físics, però poden ajudar a comprendre quan no es disposen d'aquests sensors. Per determinar si els valors que ofereixen els punts SIMAR, s'han comparat tots els valors màxims mensuals per un interval de 5 anys, tant de la boia de Capdepera com del punt SIMAR més proper. Es seleccionen tots aquells valors que queden per sobre d'un cert llindar, i es compara la mitja per a cada tipus de sensor. El resultat és que la mitja és molt similar, fins i tot oferint valors superiors per la boia de Capdepera. En segon cas, seguint el procediment que es descriu a continuació, es calculen els coeficients de Weibull tenint en compte només les dades de Capdepera, i tenint en compte tots els anys entre la boia i el punt SIMAR. Amb els coeficients, es calcula una alçada d'ona per un temps de retorn determinat. Finalment, el valor d'alçada d'ona es major pel càlcul considerant el punt SIMAR, pel que es creu que els valors que s'haurien registrat durant els 4 últims anys no es poden ometre.

A continuació es defineixen dos processos principals pel càlcul del règim extremal. Per una banda, determinar els coeficients de la funció Weibull que definiran l'onatge extrem. Per altre banda, determinarem la relació entre l'alçada d'ona significativa i el període de pic.

### 2.2.2.1 CÀLCUL COEFICIENTS WEIBULL.

Els sensors registren dades característiques del comportament del mar, com és l'alçada d'ona significant i el període de cada ona. Segons el valor d'alçada d'ona, si supera una cert valor es considera un temporal. Cada temporal es pren com a durada màxima de 5 dies, i per tant en aquell interval de temps només es prendre un valor característic del temporal. Com s'ha comentat, es pren nota de l'alçada d'ona significativa i el període d'ona de cada succés. Tenir la relació entre ells és vital pel segon procés de càlcul anteriorment esmentat. Ordenem tots els temporals que s'han registrat de més gran a més petit. Numerant amb l'ordre final, començant pel temporal amb la alçada d'ona més gran. A continuació, segons la formulació que s'utilitzi, es procedeix a atribuir un valor de probabilitat d'excedència per cada temporal. Normalment per atribuir aquest valor no es té en compte l'alçada d'ona, sinó que es calcula segons la posició i la numeració que s'ha atribuït a cada temporal. Per tant ens basarem

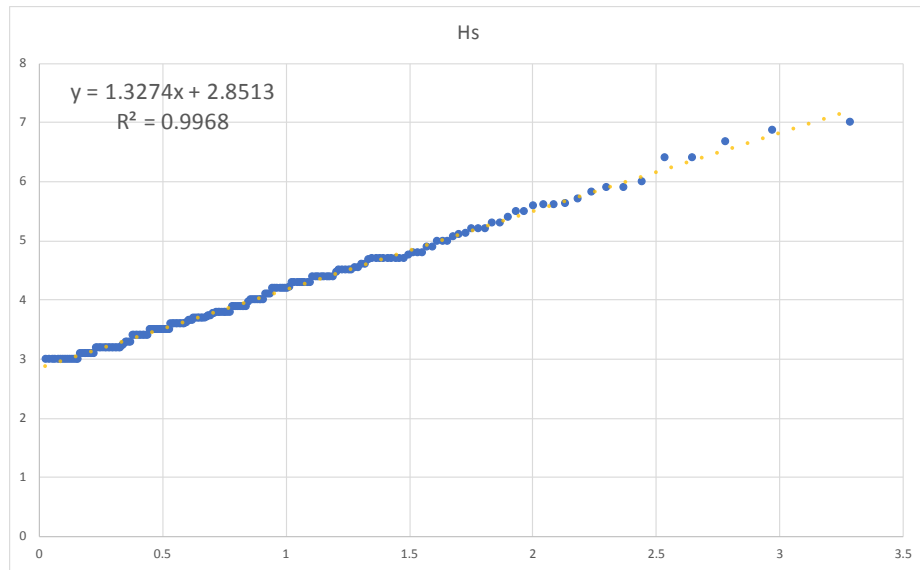
Com s'ha dit, aquest primer procés ens permet calcular els coeficients de Weibull per caracteritzar l'onatge. La funció Weibull genera una distribució de la probabilitat d'excedència en funció de l'alçada d'ona.

---

Els coeficients característics d'aquesta funció A, B i C es defineixen segons el tipus d'onatge que es pugui donar a cada zona. Per tant, en el punt en el que estem tenim la relació entre alçada d'ona i probabilitat d'excedència atribuït a cada valor d'alçada d'ona. Per definir els valors dels coeficients amb els que treballarem posarem en relació aquestes dades mitjançant la funció Weibull. Simplificarem la funció a partir de la següent relació:

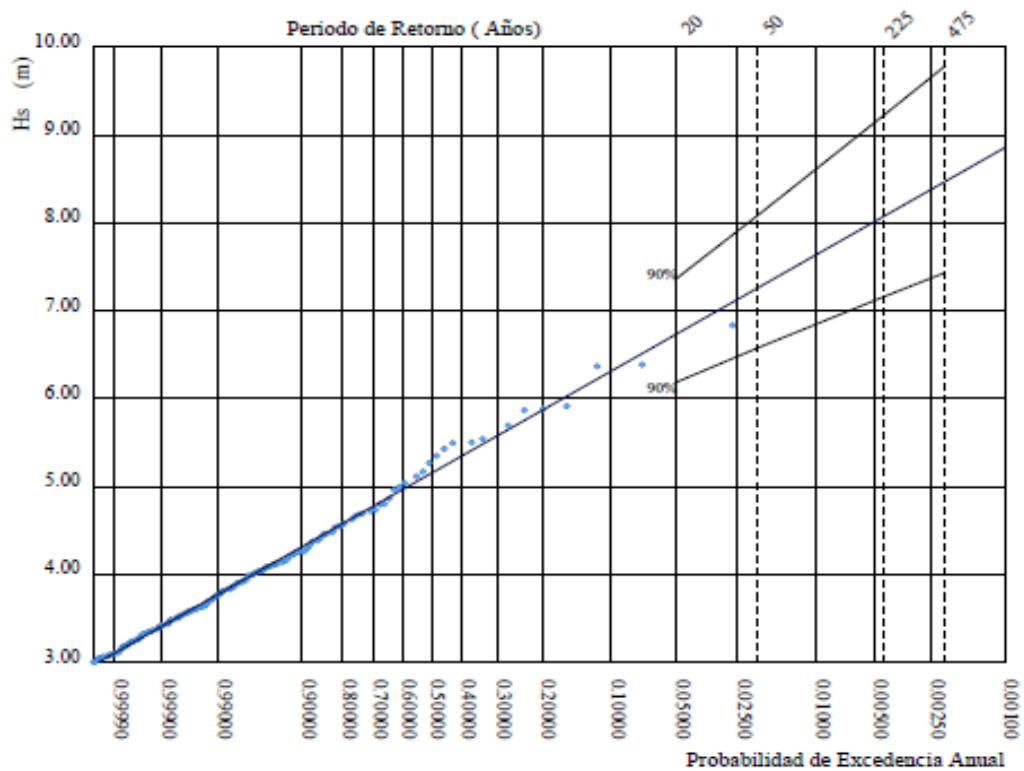
---

A continuació podem calcular el valor "y" per cada nivell de probabilitat d'excedència atribuït anteriorment. Com podem veure la funció "y" simplifica la equació a treballar fins a deixar-la en funció del coeficient de forma C. La relació entre l'alçada d'ona i el valor "y" genera un núvol de punts, que es pot representar com una recta. Calibrarem aquesta recta donant valors al coeficient C, trobant aquell que millor s'ajusta i menys error ofereix. Ens fixarem en el error quadràtic de la recta de tendència per ajustar correctament el coeficient C. Automàticament els valors dels coeficients A i B es poden calcular de l'equació de la recta de tendència resultant a partir de les següent relació.



#### REGIMEN EXTREMAL ESCALAR DE OLEAJE

LUGAR : Capdepera  
 PARÀMETRO : Altura Significante  
 PROFUNDIDAD : 48.0  
 SERIE ANALIZADA : May. 1989 - May. 2012



Font: Informe de boia de Puertos del Estado.

Amb aquest procediment tenim determinats els coeficients de Weibull que definiran el tipus d'onatge que hem d'estudiar i els valors de probabilitat d'excedència que es poden donar.

Al apartat de propagació es comenta el procediment per a calcular la ona de disseny a treballar, i com s'utilitza la funció Weibull per a realitzar aquest càlcul.

Finalment aquests son els valors que s'obtenen. En primer lloc s'exposen els valors calculats pel mètode, amb dades extretes de la boia i del punt SIMAR. En segon lloc, també es poden veure els valors que presenta *Puertos del Estado* dins del seu estudi de clima extremal per la boia de Capdepera.

Valors de la funció de distribució Weibull, segons probabilitat d'excedència.	Alpha	2.8513
	Beta	1.3274
	Gamma	1.4

Parametros de la Distribucion Weibull de Excedencias	Alfa = 2.96
	Beta = 1.00
	Gamma = 1.25

### 2.2.2.2 CÀLCUL RELACIÓ TP/HS.

El segon procediment que s'havia esmentat, i necessari per l'estudi del clima extremal, és obtenir la relació entre alçada d'ona significant i període de pic. A partir de dades obtingudes dels temporals registrats, es vol trobar una funció que relacioni el valor de l'alçada d'ona amb el període de pic. Això s'aconsegueix fent un estudi probabilístic de que es pugui donar un cert valor de període quan es té una alçada d'ona determinada.

Per a realitzar aquest càlcul, utilitzarem les alçades d'ones amb els períodes de pic corresponents que s'han registrat. Perquè el càlcul sigui més significatiu, agafarem els mateixos temporals que a l'apartat anterior per calcular els coeficients de Weibull.

A la taula que es mostra a continuació il·lustra la distribució percentual de la relació alçada d'ona i període de pic per la zona d'estudi. A partir d'aquestes dades podrem extreure una relació en fórmula per extreure valors concrets segons alçada d'ona.

Tabla Periodo de Pico (Tp) - Altura Significativa (Hs) en %

Hs (m)	Tp (s)											Total
	≤ 1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	> 10.0	
≤ 0.5	-	-	1.981	7.036	9.509	7.483	3.322	0.843	0.224	0.087	0.064	30.547
1.0	-	-	0.147	3.127	6.797	10.036	11.209	4.001	0.543	0.146	0.050	36.055
1.5	-	-	-	0.047	1.042	2.403	5.131	6.629	1.767	0.394	0.053	17.465
2.0	-	-	0.002	0.003	0.075	0.517	1.382	3.142	1.947	0.491	0.081	7.638
2.5	-	-	-	-	0.005	0.059	0.399	1.267	1.450	0.730	0.096	4.005
3.0	-	-	-	-	0.002	0.005	0.056	0.357	0.826	0.717	0.138	2.100
3.5	-	-	-	-	-	-	0.008	0.110	0.307	0.525	0.126	1.076
4.0	-	-	-	-	-	0.002	0.002	0.016	0.102	0.331	0.157	0.609
4.5	-	-	-	-	-	-	0.009	0.009	0.025	0.144	0.127	0.315
5.0	-	-	-	-	-	-	0.002	0.005	0.002	0.034	0.067	0.109
> 5.0	-	-	-	-	-	0.002	0.002	0.014	0.012	0.008	0.043	0.081
Total	-	-	2.130	10.212	17.428	20.506	21.520	16.392	7.205	3.606	1.001	100 %

Font: Informe de boia de Puertos del Estado.

En primer lloc, generarem una taula amb els valors de període de pic i d'alçada d'ona elevat a un valor Z. Aquest valor Z serà un paràmetre de la equació que haurem de determinar. Per iniciar el càlcul, donarem un valor 0.5 aquest paràmetre. Amb aquesta taula generarem un núvol de punts i estudiarem la recta de tendència, així com la seva equació i el error quadràtic. Important que hem de fixar aquesta recta de tendència amb inici al 0.0 de manera que serà un recta de tipus  $y = m \cdot x$ .

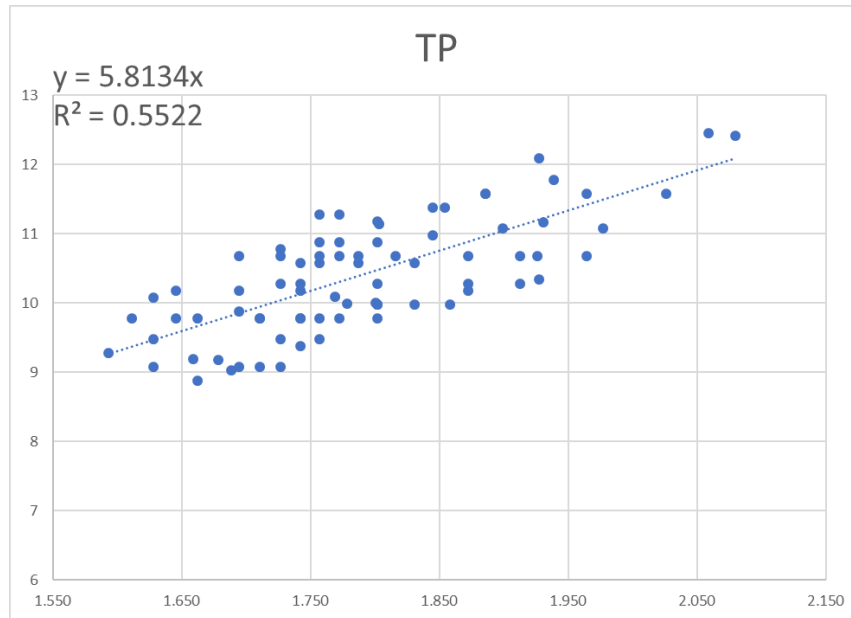


Fig. 16. Exemple del gràfic d'ajust de la formulació. Realitzat amb dades dels temporals anuals durant el període 1989-2018. (Excel).

Seguidament, per ajustar correctament la nostra funció, desconsiderarem aquells valors que han quedat excepcionals, i s'allunyen exageradament de la zona de tendència. Un cop desconsiderats aquells valors excepcionals, calibrarem el valor del paràmetre Z a partir del comportament del error quadràtic. Ajustarem aquest paràmetre per aconseguir un recta més pròxima a la zona de tendència i a minimitzar l'error. Finalment la relació resultant amb la que treballarem serà la següent.

### 2.3. PROPAGACIÓ

El procés de propagació determina els valors d'alçada d'ona incidents al port d'estudi. L'evolució d'una onada en propagar-se estarà en funció de les variables característiques del mar per a la zona d'estudi, com seran l'alçada d'ona amb la que es treballarà, i conseqüentment el període associat aquesta alçada d'ona.

D'altra banda, la propagació analitza l'evolució d'una ona al traslladar-se d'un punt a un altre. Conèixer les variables d'alçada d'ona i període de la onada ens permetrà determinar les característiques en qualsevol punt del seu viatge. El punt de partida d'aquesta propagació partirà d'una posició d'on puguem conèixer informació característica del estat del mar, en aquest cas la boia de Capdepera. Aquest punt el determinarem com a zona d'aigües profundes. En segon lloc, l'onada la farem viatjar en direcció al port, punt on desitgem obtenir l'alçada d'ona incident.

Per tant, podem determinar dos procediments separats per a determinar els valors d'alçada d'ona incidents. Aquests valors d'alçada amb els que treballarem els anomenarem alçada d'ona de disseny ( $H_D$ ).

Un primer procediment de càlcul consistirà en la obtenció de de l'alçada d'ona en aigües profundes. El segon procediment serà la propagació des de aigües profundes fins a incidir amb el dic del port.

### 2.3.1. CÀLCUL EN AIGÜES PROFUNDES.

En tot disseny de construcció de dics i ports s'ha de determinar un cert valor d'alçada d'ona a treballar. Donat que el comportament del mar és molt variat i es poden donar valors d'alçada d'ona molt diferents, cal prendre una decisió sobre el valor d'alçada amb el que es treballarà. Si es té en compte una alçada d'ona molt petita, els valors de disseny que es poden obtenir estaran sota dimensionats. Aquest fet augmenta la probabilitat de tenir problemes en períodes de temporals forts. D'altra banda, utilitzant valors molt alts d'alçada d'ona, el port pot estar sobre dimensionat. En aquest cas, aquesta consideració pot portar un gran augment del pressupost del projecte.

Per obtenir un valor d'alçada d'ona de disseny adequat definirem uns valors de risc (E) i de vida útil (L) característics del port d'estudi. Els valors que utilitzarem pel risc i la vida útil vindran condicionats per la tipologia de port. Les característiques que s'observaran serà, per un costat, la tipologia del dic d'abric, poden ser en dic en talús o dic vertical. I en segon terme la funcionalitat del port, poden ser de caràcter industrial, o de caràcter general. La definició exacte de la tipologia de port, i els seus valors de risc i vida útil, es poden trobar dins del programa ROM 0.2-90 de *Puertos del Estado*.

Aquests valors seran l'origen per determinar el temps de retorn ( $T_r$ ) a tenir en compte per aquest port, entenent per temps de retorn, el temps mig en que pot succeir un eventualitat específica. Per a enginyeria portuària el temps de retorn analitza el temps mig en que un temporal superarà un cert valor d'alçada d'ona. S'analitza l'alçada d'ona per ser el principal factor condicionant pel comportament d'un port. En interactuar una onada amb un dic, es produeix una dissipació d'energia, la qual pot provocar problemes tant de servei com estructurals al port.

A partir de la relació següent es pot calcular el temps de retorn.

---

A continuació es mostra les taules per a conèixer els valors de vida útil (L) i risc (E) que es presenten a *Puertos del Estado*.



<b>TABLA 2.2.1.1. VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS O INSTALACIONES DE CARÁCTER DEFINITIVO (en años)</b>			
<b>TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN</b>	<b>NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO</b>		
	<b>NIVEL 1</b>	<b>NIVEL 2</b>	<b>NIVEL 3</b>
<b>INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>50</b>

**LEYENDA:**

**INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL:**  
Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto.

**DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO:**  
Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo,...).

**NIVEL 1:**  
Obras e instalaciones de interés local o auxiliares.  
Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones,...).

**NIVEL 2:**  
Obras e instalaciones de interés general.  
Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...).

**NIVEL 3:**  
Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).

Font: Extret del programa ROM de Puertos del Estado

Per al port en objecte d'aquest estudi, s'escollirà una vida útil corresponent als ports de caràcter general i de nivell 1. **Vida útil = 25 anys.**

TABLA 3.2.3.1.2. RIESGOS MÁXIMOS ADMISIBLES PARA LA DETERMINACIÓN, A PARTIR DE DATOS ESTADÍSTICOS, DE VALORES CARACTERÍSTICOS DE CARGAS VARIABLES PARA FASE DE SERVICIO Y CONDICIONES EXTREMAS			
a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.  Índice : $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	BAJA	0,50	0,30
	MEDIA	0,30	0,20
	ALTA	0,25	0,15
b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.  Índice r: $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	BAJA	0,20	0,15
	MEDIA	0,15	0,10
	ALTA	0,10	0,05
Se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o el de destrucción total según las características de deformabilidad y de posibilidad o facilidad de reparación de la estructura resistente. Para obras rígidas o de rotura frágil sin posibilidad de reparación se adoptará el riesgo de destrucción total. Para obras flexibles, semirígidas o de rotura en general reparable (daños menores que un nivel prefijado función del tipo estructural) se adoptará el riesgo de iniciación de averías. En este tipo de obras podrá adoptarse también el riesgo de destrucción total, definiendo para cada tipo estructural el nivel de daños aceptado como de destrucción total. La acción resultante se considerará como accidental.			

Font: Extret del programa ROM de Puertos del Estado

En aquest punt cal especificar quines estructures poden presentar risc d'averies i quines altres poden portar a la destrucció total. Pel que fa al port d'estudi, aquelles estructures verticals portaran a destrucció total i per tant es determinarà un risc de **E=0.2**. Per altre banda per estructures en talús correspondran al risc determinat per inici d'averies igual a **E=0.5**.

En resum, pel que fa al port de cala ratjada, es donen els següents valors segons tipologia.

ALINEACIÓ	RISC	VIDA ÚTIL	TEMPS DE RETORN
MORROT	0.2	25	112.54
MIG	0.2	25	112.54
COSTA	0.5	25	36.57

Es pot comprovar que el temps de retorn segons la tipologia del dic pot variar. Això comportarà que el valor d'alçada d'ona de disseny sigui diferent segons la secció.

A continuació es calcula la probabilitat de no excedència relacionada amb el temps de retorn. La idea és que, per poder determinar amb quina alçada d'ona de disseny treballar per a projectar el port, voldrem assegurar primer, que escollim una alçada d'ona que es pugui donar o pugui ser superada amb poca freqüència en el interval de retorn. De manera que en dissenyar el port, dimensionarem aquest tenint en compte els valors d'alçada d'ona i energia que es donin per aquesta alçada d'ona. Per tant, per cada valor de temps de retorn correspondrà un valor de probabilitat de no excedència. Aquest valor serà la referència per a calcular el valor d'alçada d'ona de disseny en aigües profundes.

On  $F_w(H_D)$  és la probabilitat de no excedència, i  $\lambda$  és el número de temporals que es donen per un any, obtingut en el clima extrem. En fer l'estudi del Clima Extrem mitjançant el mètode POT, es tenen en compte més d'un temporal per any, i aquesta eventualitat es reflecteix aplicant la lambda, com a factor de majorat.

ALINEACIÓ	TEMPS DE RETORN	PROB. NO EXCEDÈNCIA
MORROT	112.54	0.9986
MIG	112.54	0.9986
COSTA	36.57	0.9958

Finalment s'obté el valor d'alçada d'ona de disseny en aigües profundes ( $H_0$ ). A partir dels coeficients de Weibull determinats en l'apartat de Clima Extremal, i la probabilitat de no excedència determinat segons el temps de retorn, podem calcular aquest valor d'alçada d'ona. Com s'ha explicat anteriorment, els coeficients de Weibull parametrizen el tipus d'onatge que es pot donar a una zona concreta. La funció Weibull determina la probabilitat de que un determinat valor d'alçada d'ona pugui ser superat, i per tant, que aquell valor sigui més o menys freqüent en aquesta zona concreta.

Llavors en cas invers, tenint definit els coeficients de Weibull, per una probabilitat de no excedència concret podem determinar una alçada d'ona que correspongui aquella probabilitat. Aquest serà el procediment de càlcul que aplicarem per a calcular el valor d'alçada d'ona en aigües profundes.

Anteriorment s'ha calculat la probabilitat de no excedència per un determinat temps de retorn. Utilitzant la funció de Weibull, i aïllant el valor de alçada d'ona podem trobar la següent relació, que ens permet calcular aquest valor d'alçada d'ona.

Els resultats que s'obtenen per a condicions d'aigües profundes en el present estudi són els següents.

ALINEACIÓ	A	B	C	PROB. NO EXCDÈNCIA	Ho
MORROT	2.85	1.32	1.4	0.9986	7.915
MIG	2.85	1.32	1.4	0.9986	7.915
COSTA	2.85	1.32	1.4	0.9958	7.295

Aquests valors d'alçada d'ona corresponen a valors en aigües profundes per la zona d'estudi en qüestió. A partir d'aquests valors procedirem a executar la propagació, i així determinar els valors d'alçada d'ona a peu d'estructura que tindrem en compte a l'hora de calcular cabals d'ultrapassament.

## 2.3.2. PROPAGACIÓ MITJANÇANT TOMAWAC.

### 2.3.2.1 PROCEDIMENT DE PROPAGACIÓ.

El procediment de propagació descriu el comportament que té una onada en traslladar-se d'un punt a un altre. Per l'objecte d'aquest estudi, el que es vol estudiar d'una onada, és el seu valor d'alçada d'ona donat una certa profunditat. Es a dir, poder conèixer quina alçada tindrà una onada en arribar a tocar amb el port.

Cal diferenciar que una onada pot patir transformacions per tres aspectes físics.

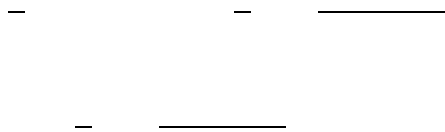
- I. Variació de la cota de del fons marí.
- II. Orientació en la direcció de la onada envers de la orientació de la costa.
- III. Efecte del vent.

Pel present estudi es tindran en compte només els dos primers fenòmens. Es a dir, es partirà de simular que un tren d'ones es desplaça des d'aigües profundes fins a la costa sense que hi hagi afectació del vent.

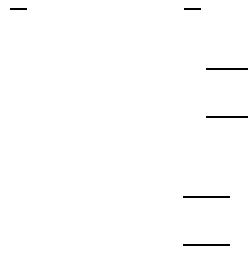
#### TRANSFORMACIÓ PER VARIACIÓ DEL FONS MARÍ

S'observa que per una onada que s'apropa a la costa, va patint variacions tant en l'alçada, com en la velocitat, com en la direcció. S'entén que la variació en la profunditat del fons marí condiciona la propagació de la onada. En aquest primer apartat es parlarà de la transformació d'alçada d'ona provocat per una variació de la celeritat.

Un primer càlcul per a conèixer les variacions d'alçada d'ona, serà a partir de la variació del flux d'energia d'una ona.

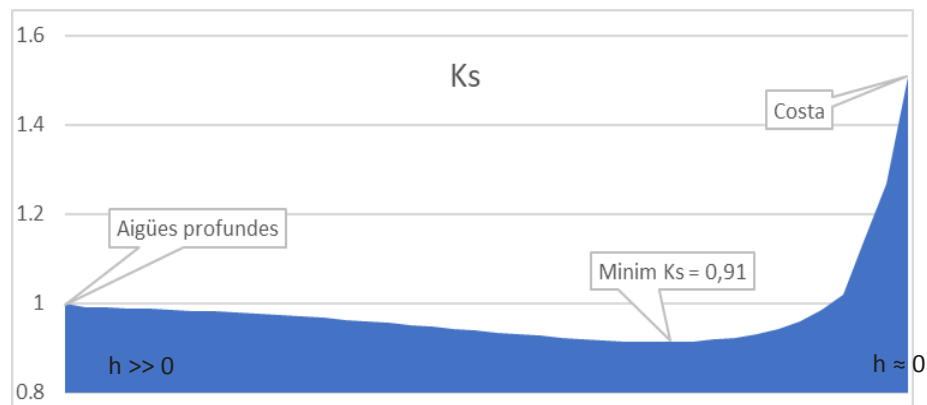


Es parteix de la base que el flux d'energia d'una onada es manté constant al llarg de la propagació. Coneixent els valors d'energia i d'alçada d'ona en aigües profundes, es pot arribar conèixer l'alçada d'ona que es donarà segons la profunditat que es trobi. Igualant el flux d'energia a la profunditat que es vol conèixer amb el flux en aigües profundes es troba la següent relació.



Definim  $K_s$  com a coeficient de shoaling. S'entén per shoaling com el comportament que té una onada en aproximar-se a la costa.

El coeficient de shoaling està condicionat per la variació de la celeritat de grup de les onades, que variarà per variació de la profunditat des de aigües profundes cap a zona de trencants. El comportament d'aquest coeficient partirà des de  $K_s = 1$  en aigües profundes, a disminuir el seu valor en aigües intermèdies, per augmentar bruscament en zona de trencants.



Gràfica 3. Exemple comportament coeficient de Shoaling.

La taula que es mostra es una il·lustració gràfica de la transformació que pateix una onada d'un metre d'alçada en passar d'aigües profundes a zona de trencants. Com es pot veure, el coeficient de Shoaling pot arribar a valors per sobre i per sota de 1.

#### TRANSFORMACIÓ PER DIFERÈNCIA ENTRE LA DIRECCIÓ DE L'ONA AMB LA COSTA

A la transformació anterior, es suposava el cas d'una ona que es dirigia completament perpendicular a la costa, sense tenir en compte l'amplada d'aquesta onada. En aquest apartat s'incorpora aquesta apreciació. Es considerarà una onada que no es perpendicular a la costa.

El procés de canvi de direcció de l'onada quan aquesta s'aproxima a la costa s'anomena refracció.

Per onades amb diferències angulars entre origen en aigües profundes, i destí a la costa, s'observa que l'onada pateix una variació important en la direcció de les crestes. En acostar-se a la costa, les crestes tendeixen a posar-se en paral·lel al perfil de la costa. A la figura que es mostra a continuació s'il·lustra el comportament d'una onada en apropar-se a una costa molt variada.

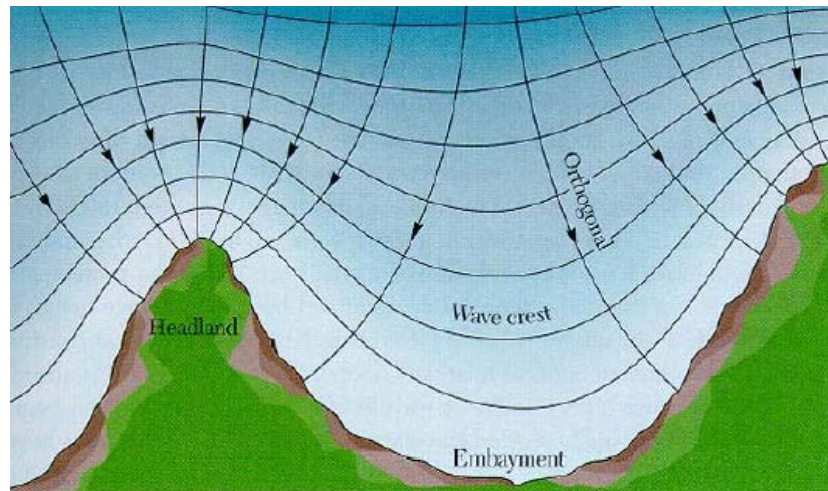
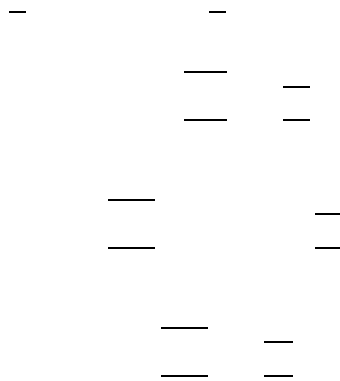


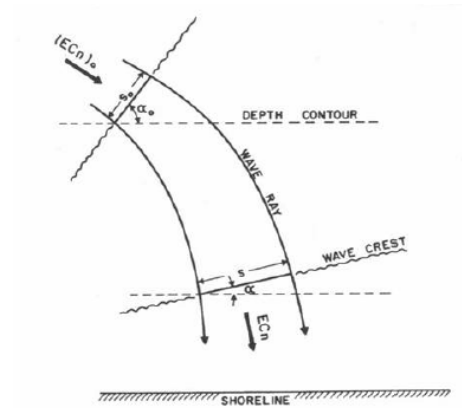
Fig 17. Exemple de la direcció de les onades sota refracció. (Apunts UPC).

Al considerar que la cresta d'una onada té una certa amplada que no es pot arribar a calcular, el càlcul del flux d'energia ha de tenir en consideració aquesta amplada. En tot cas, el flux d'energia haurà de ser calculat per unitat d'amplada de la onada. Per conèixer els efectes de la variació en la direcció de la onada, repetim el càlcul realitzat en l'apartat anterior, però considerant el flux d'energia per unitat d'amplada.

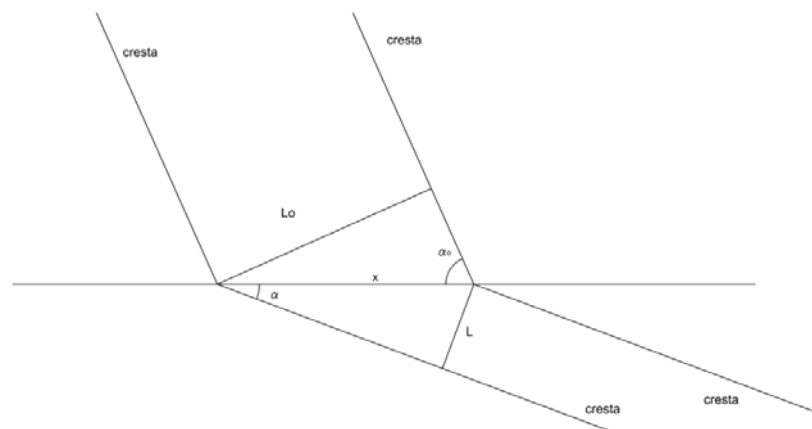


En primer lloc es troba el coeficient de refracció parcial ( $K'_R$ ) coeficient corresponent al procés de refracció, i que té en compte la direcció de l'onada i el de la costa. En segon lloc es resumeix com a coeficient de refracció total la multiplicació de tots dos coeficients. Per tant, aquest coeficient de refracció total significa el comportament de l'alçada d'ona segons direccionalitat i fons.

Per últim, queda explicar com arribar a conèixer la variació d'angle en la direcció d'una onada en el seu procés d'aproximar-se a la costa. Per a poder calcular el coeficient de refracció parcial amb valors coneguts, variarem la expressió, i passar de tenir una equació en funció de  $s_0$ , distància determinada entre de raigs, a posar-la en funció del cosinus de l'angle de direcció.



Per les dades que es recullen amb els sensors i de manera visual, es pot conèixer la direcció de les onades. Típicament, els sensors fixes, com són les boies, són els elements més fiables per obtenir dades de direccionalitat, i aquests sensors solen estar situats només en aigües profundes. Així doncs, cal calcular quina nova direcció prendrà la onada en disminuir la profunditat. Per a fer aquest càlcul, aplicarem el mètode de les ortogonals conegut com a Llei de Snell. S'aplica aquesta formulació a partir de considerar la següent figura.



En aquesta figura es pot veure la transició de les crestes en creuar un escaló on disminueix la profunditat. Es pot veure a la part superior, onades més separades i amb un angle major. I en passar a la part inferior, la separació entre onades, equivalen a la longitud d'onada, ha disminuït, així com l'angle d'incidència. Prenent el segment "x" comú entre els triangles podem arribar a concretar la llei de Snell.

Resolent la llei de Snell i aïllant el valor de l'angle incident, podem arribar a calcular el seu valor, si coneixem la resta de valors.

---

Finalment, aquesta és la base teòrica amb la que ens recolzem per a procedir a simular la propagació d'una onada des de aigües profundes fins la costa. Aplicarem el coeficient de refracció total per a calcular l'alçada d'ona a peu d'estructura.

### 2.3.2.2 NECESSITAT D'UTILITZAR TOMAWAC

TOMAWAC és un programa de modelatge numèric integrat dins del sistema de TELEMAC-MASCARET. Aquest sistema es tradueix en una poderosa eina de modelatge corresponent al camp del flux lliure superficial. Dins de les seves capacitats destacariem 3 grans grups.

- I. L'estudi de la hidrodinàmica. Que podem trobar el càlcul del flux que es pot donar a canals i rius, fins a 3 dimensions aplicant les formulacions de Navier-Stokes. També engloba la propagació en zones costaneres, així com l'estudi de l'agitació interna d'un port.
- II. Derivat del estudi de la hidrodinàmica, també podem trobar el modelatge de la dispersió i transport de sediments.
- III. Per últim, es pot trobar una petita aportació al flux subterrani.

TELEMAC-MASCARET treballa a partir de algoritmes en el càlcul de elements finits. Es caracteritza l'espai de treball a partir de generar una mallat d'elements triangulars totalment caracteritzada, podent descriure zones més fines per extreure una informació més específica en un punt concret. Amb aquest tipus de procediment, es pot definir l'espai de treball desitjat, i a partir del mallat, determinar tots els punts on es podran obtenir resultats numèrics. El resultat és una malla on s'aniran obtenint els valors en els punts d'estudi determinats segons l'evolució al llarg del temps. No només s'obté un anàlisi global de la simulació, si no que es poden obtenir valors de punts molt específics.

Per l'objecte d'aquest estudi, obtenir l'onatge més perjudicial per ultrapassament en el port de Cala Ratjada, és d'una gran utilitat l'ús del sistema de TELEMAC-MASCARET, per a fer la simulació de propagació d'ona. Dins del grup de TELEMAC-MASCARET trobem diferents programes segons la funció que busquem. En el nostre cas prestarem atenció al programa TOMAWAC. Dins del grup, aquest programa ens permet simular la propagació d'ones en zones costaneres. Així doncs, fent ús d'aquest programa, podem obtenir la procés de propagació d'una onada, que va des de aigües profundes fins que arriba a la costa i al port. Definint correctament la nostra zona d'estudi, es poden obtenir els valors d'alçada d'ona que s'obtindrà al llarg de tot el dic extern, així com a diferents profunditats o a una certa distància d'aquest. Aquest fet, és el concepte principal pel que es fa necessari treballar amb aquest programari. A continuació es farà un breu resum del funcionament del programa, per fer-ne ús.

Cal descriure 3 documents diferents per executar correctament una simulació amb TOMAWAC. En els pròxims apartats es defineixen els documents empleats i creats per la simulació referent aquest projecte. Per aquest resum, es farà referència a un exemple molt simplificat, per a simular una onada que es trasllada d'est a oest, en un domini rectangular i una costa irregular.



1. **Generar una batimetria.** En primer lloc en format de punts, i mitjançant un preprocessador, acabar generant una malla d'elements triangulars que caracteritzi l'espai de treball. El resultat final es guarda com a un document únic que contingui aquesta malla triangular.

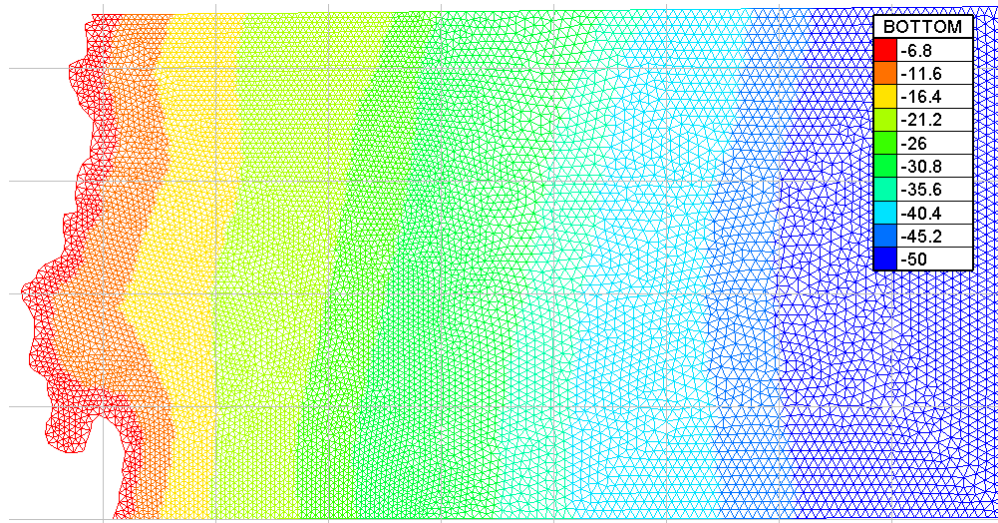


Fig 18. Malla triangular de la batimetria. (Blue Kenue)

2. **Definir les condicions de contorn.** Els límits que defineixen el nostre han de ser definits en una de les 3 possibilitats que es poden donar: límit per on entren les onades, límit rígid o de costa, o límit deigua lliure.

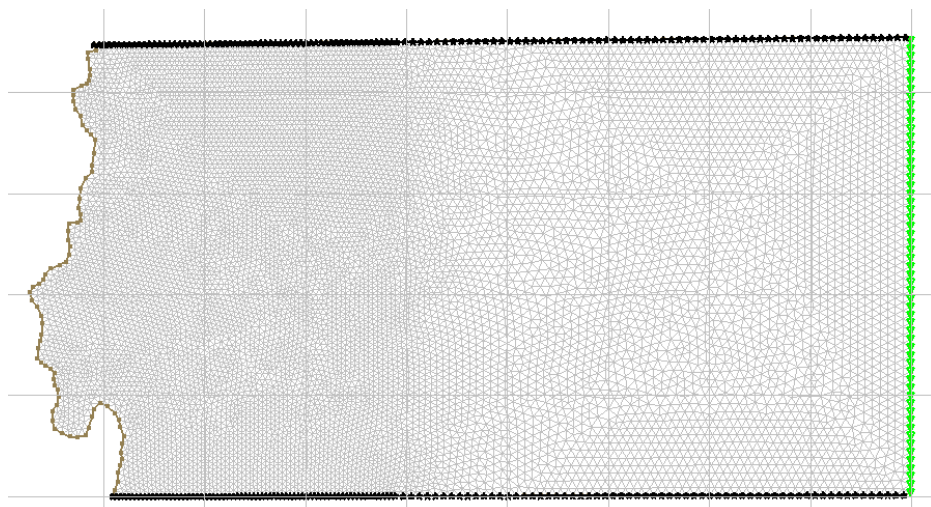


Fig 18. En colors estan les 3 condicions de contorn: Verd per l'entrada d'ones, gris pel límit fix i en negre la superfície lliure d'aigua. (Blue Kenue).

3. **Parametritzar la simulació.** Definir quines condicions es donaran per a fer la simulació. Seran els valors específics que es tindran en compte per reproduir els resultats, com es l'alçada d'ona, direccionalitat, vent, temps de simulació,...
4. Finalment, generant els 3 documents anteriors i executant la simulació, s'obté un **quart document on s'exposen els resultats obtinguts** i que podrem manipular a partir d'un post-processor.

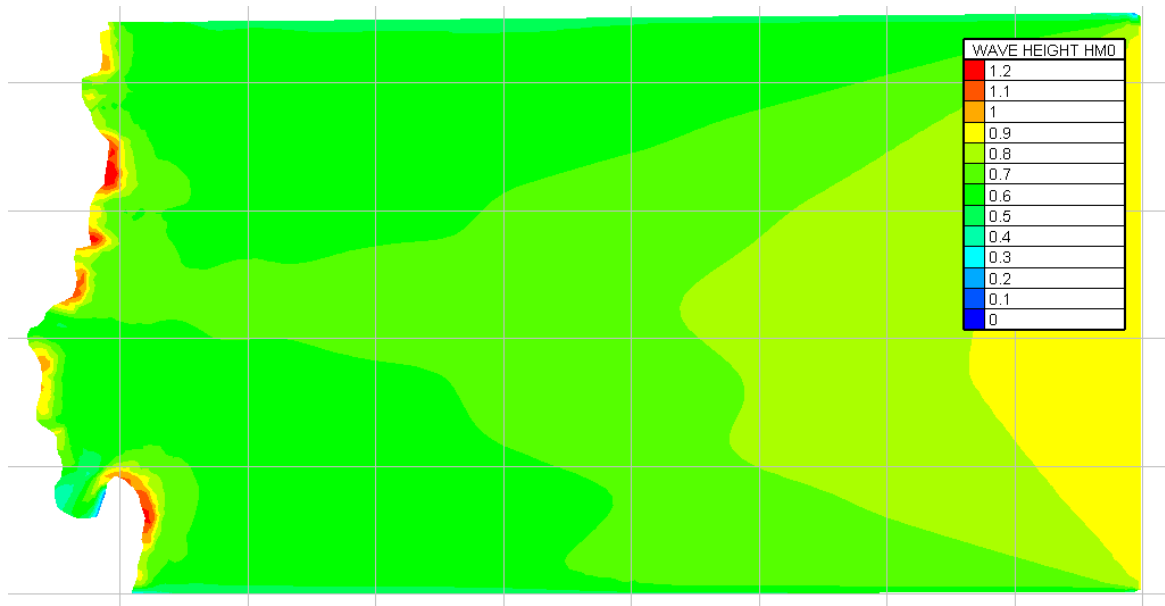


Fig 19. Resultat en alçat 2D pel que fa a l'alçada d'ona per la zona de treball un cop passat tot el temps de simulació. (Blue Kenue)



Fig 20. Resultat en perfil 3D pel que fa a l'alçada d'ona per la zona de treball un cop passat tot el temps de simulació. (Blue Kenue)

### 2.3.2.3 GEOMETRIA (BATIMETRIA I MALLATGE)

Per explicar correctament el següent apartat es presenten 3 subapartats. Aquests subapartats pretenen separar els 3 procediments mes rellevants que s'han de tenir en compte per definir i crear la malla de treball.

#### 2.3.2.3.1 DOMINI

Definim com domini l'espai geogràfic tancat que servirà d'espai de treball, on realitzarem la simulació i definirem la batimetria corresponent. Per l'estudi en qüestió, aquest domini estarà format per 1 contorn irregular per limitar la costa, i 3 altres contorns rectes que descriuran els límits dins del mar.

El punt de partida d'aquest estudi és el port de Cala Ratjada, per això centrarem sempre el espai de treball en funció del port. Com es pot veure en els resultats de l'exemple presentat anteriorment, els valors d'alçada tendeixen a disminuir quan mes a prop d'un límit lliure estan, donada per la diferència de valor d'alçada d'ona entre el límit i l'onada que s'està propagant. D'aquesta manera, per a definir correctament la batimetria, caldrà ampliar el domini al llarg de la costa fins que sigui necessari. Per conèixer la amplada exacte del nostre domini serà necessari realitzar simulacions de prova i comprovar si la dispersió de la onada no afecta a la zona d'estudi. Per altre

banda, també caldrà portar el domini mar endins fins a una certa profunditat. Per decidir aquest criteri, escollirem el valor mínim entre la profunditat límit que marca l'inici d'aigües profundes, o d'altra banda, la profunditat aproximada de la zona on hem extret les dades, que pot ser un sensor o un punt de modelatge numèric. Pel primer cas s'haurà de calcular la profunditat límit que marca el inici d'aigües profundes. Tenint en compte la següent relació es pot arribar a trobar aquest valor. Aquesta relació marca el límit pel qual considerarem que ens trobem en aigües profundes o intermèdies.

$$\frac{L_0}{T} = \frac{g}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{L_0^2}{H^2}}}$$

Com es pot veure és necessari calcular la longitud d'ona en aigües profundes ( $L_0$ ). Tenint en compte els les dades ja calculades anteriorment de l'alçada d'ona de disseny en aigües profundes, i la relació per calcular el període de pic segons alçada d'ona, es pot calcular la longitud d'ona a partir de la seva fórmula.

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi}$$

Pel que fa a les dades referents aquest estudi, **el límit d'aigües profundes es troba a una profunditat de 112 metres.**

Comparem aquest valor amb la profunditat de fondeig per la boia de Capdepera, que son 48 metres. Donat que hem extret els valors d'aquest sensor i la seva profunditat es menor, escollirem aquesta profunditat com a límit per a definir el nostre domini.

Finalment, el domini que tindrem en compte per a realitzar la nostre batimetria anirà des de passat el Cap de Capdepera, a prop de la platja de Cala Agulla, fins gairebé arribant a la platja de Canyamel, passat el Cap Vermell. Anomenarem domini general aquest espai de treball establert. Sobre aquest domini general, tenint de referència els seus límits i el valor de la profunditat límit, generarem la batimetria corresponent. Tornarem anomenar domini a nous espais de treball per les diferents situacions de temporals que es poden donar i es vol estudiar. Aquests nous dominis sempre quedaran definits dins del marc del domini general, i per tant, una única batimetria creada tenint en compte el domini general, serà suficient per a la resta de dominis.

La figura següent mostra el marc que engloba el domini general.



*Fig 21. Domini a estudiar, vist des de Google Maps.*

#### 2.3.2.3.2 BATIMETRIA

La batimetria té una importància vital, ja que, ha de descriure la profunditat del fons marí, i la evolució que te mentre s'aproxima a la costa. Com em vist anteriorment, a l'apartat de propagació, l'evolució de la profunditat serà el principal factor per poder definir el valor d'alçada d'ona que es podrà obtenir a peu d'estructura.

Definim batimetria com el conjunt de punts geogràfics (definitos en les coordenades X,Y,Z) que conjuntament descriuen les cotes de nivell del fons marí.

Pel present estudi s'ha creat una batimetria completa, generant punt a punt totes les cotes de nivell. En aquest cas, s'han utilitzat 2 fonts de informació. Per una banda una batimetria en arxiu CAD que descriu el fons marí per la zona propera al port i fins a una fondària de 15 metres, proporcionada per la administració de *PORTS DE LES ILLES BALEARS*. Aquesta batimetria, probablement molt fiable, és insuficient pel que fa al domini descrit anteriorment. Així que cal complementar aquesta batimetria a partir d'analitzar cartes nàutiques via internet. Dins la pàgina web de la marca NAVIONICS, [webapp.navionics.com](http://webapp.navionics.com), podem trobar de manera àgil i visual les cotes de nivells marins per qualsevol punt del món. Aquestes cotes de nivells que es poden veure es presenten com a línies de nivell que recorren el relleu marí. A continuació es presenta una imatge d'exemple de les cartes nàutiques que ofereix aquesta aplicació.

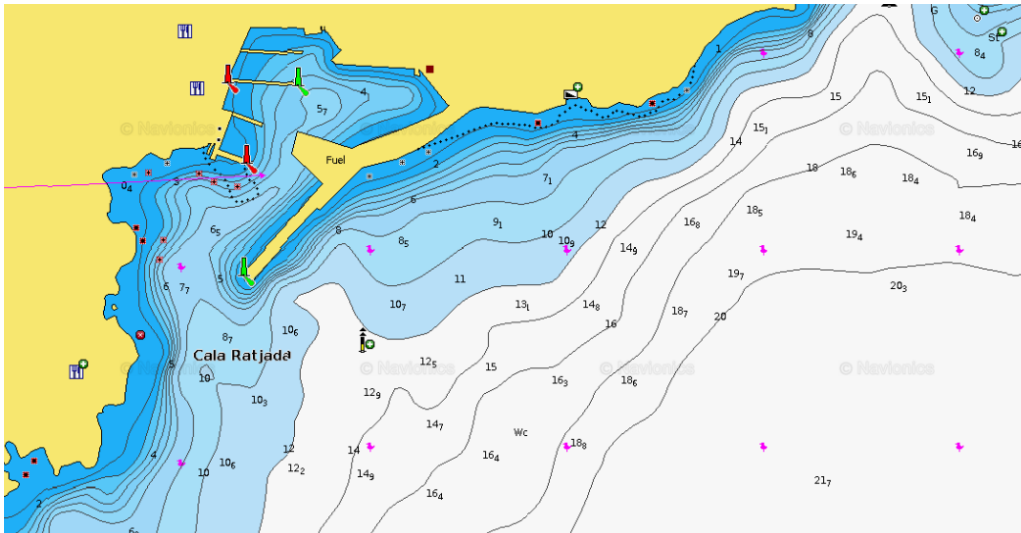


Fig 22. Carta nàutica digital de NAVIONICS pel port de Cala Ratjada (Font: Navionics Webapp).

Així doncs, a partir d'aquestes cartes nàutiques digitals completarem la resta de batimetria per tot el domini general. El procediment a seguir es el següent.

- I. Fotografiar digitalment tot el espai on es vol crear la batimetria, i adjuntar les fotografies al arxiu CAD proporcionat per *PORTSIB*. Utilitzarem AutoCAD per manipular l'arxiu i crear tots els punts geogràfics. S'hauran de fer un gran número de fotografies per poder representar tot el domini general, ja que, per aconseguir una bona resolució de les cotes de nivell que ens interessa, cal fer les fotografies digitals amb la escala mínima possible.

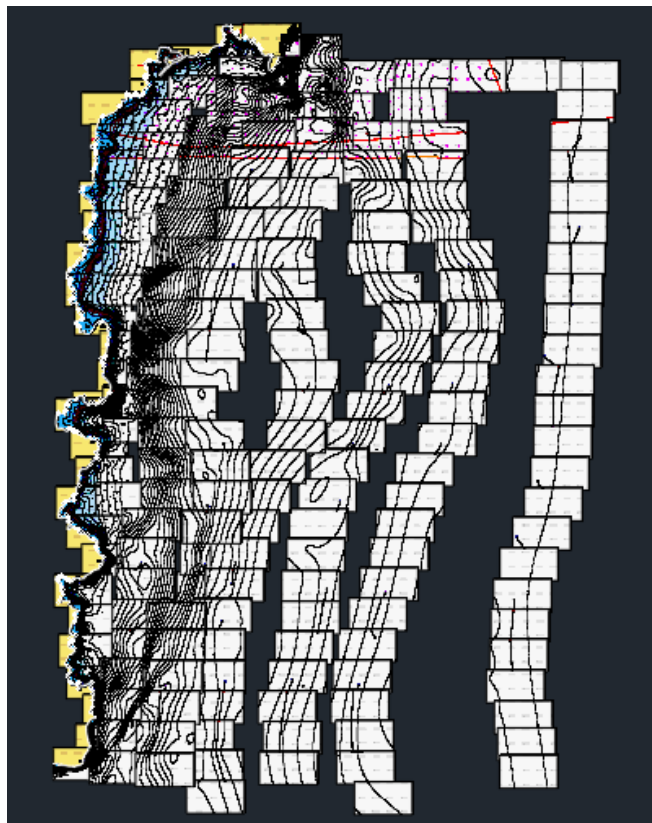
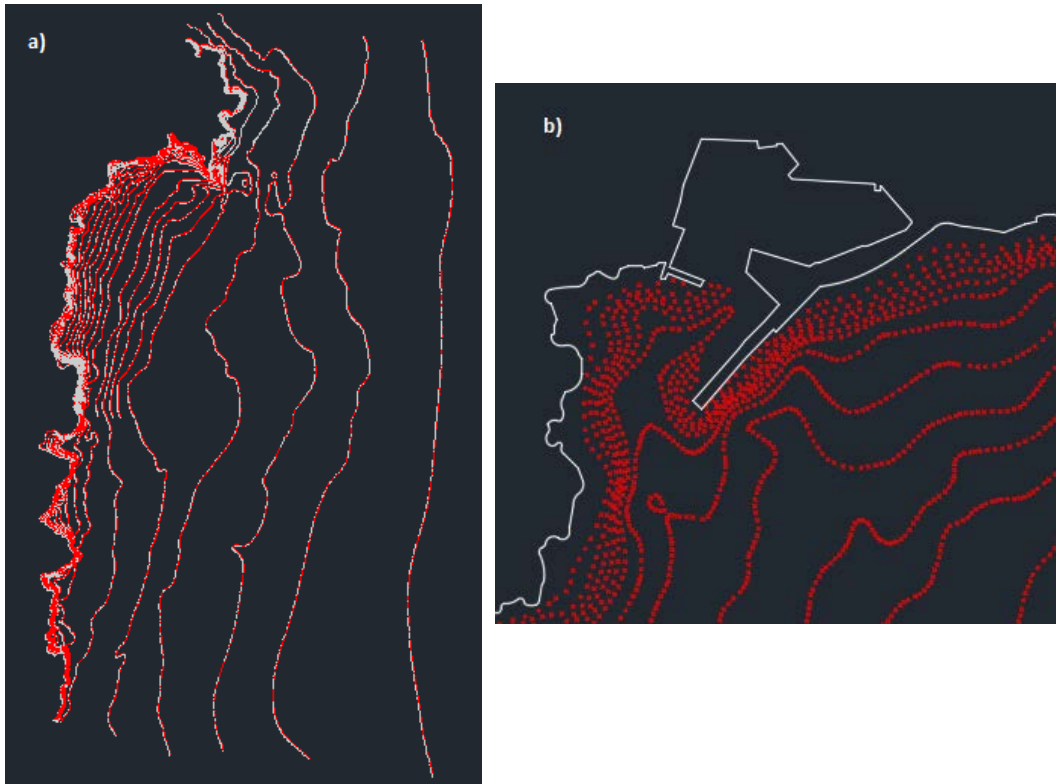


Fig 22. Més de 150 fotografies digitals per descriure el domini des de Cap Vermell fins el Faralló de Cala Gat. (AutoCAD).



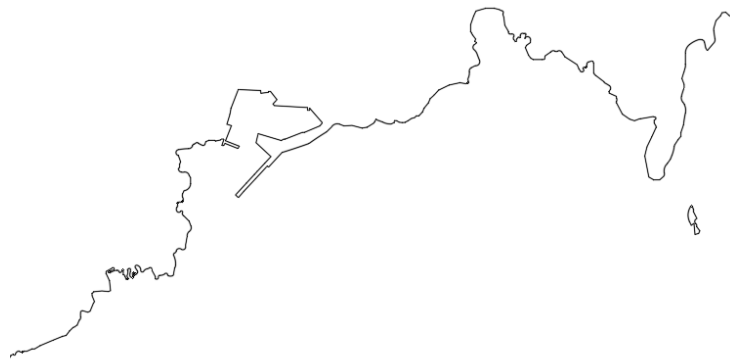
- II. Un cop es tenen totes les imatges adjuntades al arxiu CAD, es crearan els punts. A partir de l'eina de creació de punts que ofereix l'AutoCAD Civil 3D, podem crear cada punt amb la cota que desitgem. D'aquesta manera, i resseguint les línies de nivell, un per un anirem creant els punts. S'ha decidit agafar línies de nivell cada 1 metre dins els 6 metres de profunditat, cada 2 metres fins els 30 metres de profunditat i finalment cada 5 metres fins el màxim de fondària als 50 metres.



**Fig 23a.** Tots els punts de la batimetria.

**Figura 23b.** Detall de la creació de punts amb AutoCAD.

- III. Crear el contorn irregular de la costa. A partir de l'eina de polilínia i resseguint la línia de la costa, generem el contorn irregular de la costa. Posteriorment, completem el domini general creant un polígon que incorpori els 3 contorns que es troben sobre el mar, a més del contorn de la costa.



**Fig 24.** Perfil detallat de la zona del port per a crear el domini general. (AutoCAD).

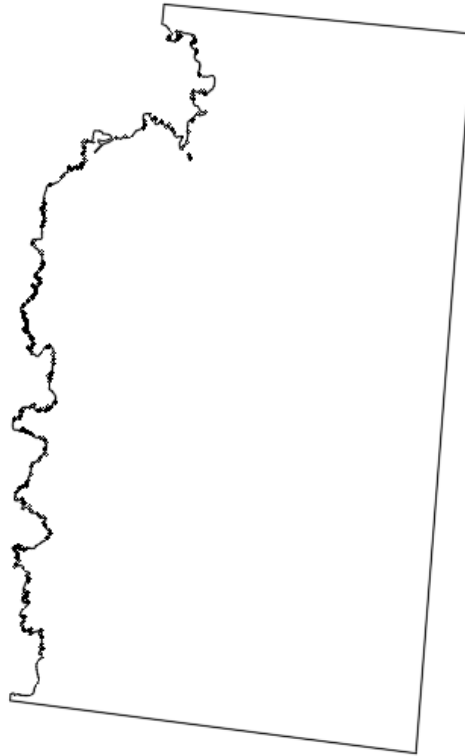


Fig 25. Domini general amb contorn irregular i contorns rectes. (AutoCAD).

- IV. Per últim, incorporem tots els punts en mateix grup de punts. Aquest grup l'exportarem com arxiu de punts de coordenades ".xyz". Aquest tipus d'arxiu serà manipulable amb Excel, i ens permet analitzar que les dades siguin correctes i estiguin correctament col·locades i ordenades. Per altre banda, exportem el domini com un arxiu de forma (*ShapeFile*) i poder així treballar-lo mes endavant.

#### 2.3.2.3.3 MALLATGE

El mallatge constitueix el pas definitiu per a crear un arxiu que contingui la batimetria i descriu tot el relleu del fons marí per tot el domini general. Aquest pas és necessari només per a poder executar la simulació mitjançant el TOMAWAC o qualsevol altre programa de modelatge numèric. El que es vol aconseguir és crear una malla creada mitjançant triangles, que tenint la referència dels punts descrits amb la batimetria defineixin tot el fons marí. Es a dir, passar d'unes línies de nivell a una superfície.

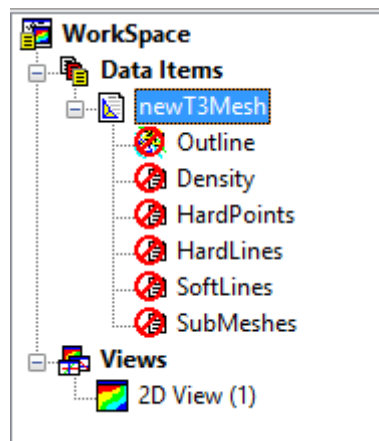
La finalitat final d'aquesta malla és que a cada node on s'uneixen diversos triangles servirà de punt de càlcul, i per tant, es caracteritzarà el resultat de l'estat del mar en cadascun d'aquests punts. Tenint aquesta idea clara crearem la malla més eficient possible. Cal pensar que cada node que tinguem serà un punt de càlcul, i per tant, quants mes punts tinguem més càlculs s'hauran de realitzar i més trigarà la simulació. Per altre banda, aquelles zones que presentin més, l'estat del mar quedarà mes ben caracteritzat. El resultat per a generar una malla el més eficient possible serà la de generar una malla més fina per la zona propera al port, i així poder obtenir molts punts consecutius on poder obtenir dades. I per contra, intentar generar una malla més gruixuda per les zones de pura propagació a profunditats mes elevades, o zones de costa llunyanes al port, i així reduir els càlculs a fer a cada simulació.



Per crear la malla hem utilitzat un pre-processor anomenat BLUE KENUE. Aquest programa ens permet generar arxius de diferents tipus, com estructures de treball amb model·lació, com son malles i figures geomètriques amb valors característics. Pel present projecte, s'ha utilitzat aquest pre-processor per a generar els arxius geomètrics, que inclouen la malla que defineix el fons marí, i per altre banda definir les condicions de contorn de la malla generada anteriorment.

A continuació es mostra els passos realitzats, juntament d'exemples gràfics per cada pas, per a crear la malla desitjada per a la simulació mitjançant el BLUE KENUE. El domini que es mostra serveix d'exemple, a l'apartat de *resultats* es mostraran els dominis utilitzats en aquests estudi. Especificar que per aquesta explicació s'ha creat una malla per a poder explicar cada pas que es te en compte, però que per arribar al resultat final no es necessari generar-les totes.

- I. Obrim un nou quadre de generació de malla dins del programa BLUE KENUE.  
Apareixerà una barra de opcions per a definir la malla que es vol generar dins del espai de treball.



Com es pot veure, hi ha 6 desplegable per a definir i generar una malla. Per qualsevol malla que voldrem generar, serà necessari definir el "Outline", la resta de desplegable seran opcionals, segons el que necessitem.

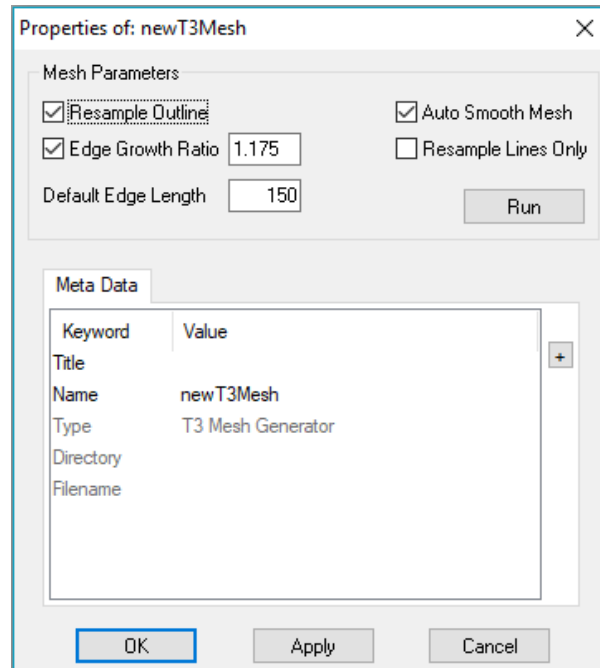
- II. Incorporar domini i generar la malla.

El "Outline" es definirà com el contorn que determinarà la malla, que per altre banda coincideix amb el domini del nostre espai de treball. Aquest domini ha de ser un polígon tancat necessàriament. Per això importarem el arxiu de forma *ShapeFile* creat anteriorment mitjançant AutoCAD i que havíem definit com a domini i l'incorporarem al desplegable "Outline". A continuació executant el generador de la malla ens apareix un quadre informatiu. Aquest quadre definirà unes característiques generals de la malla. Ens fixarem en dues característiques.

- *Edge Growth Ratio*. Aquest factor definirà la transició de creixement entre triangles de diferent mida.

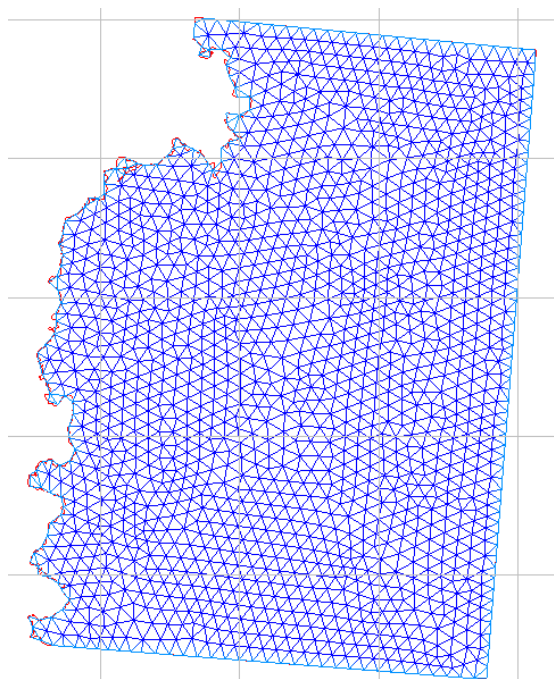
- *Default Edfe Lenght.* Aquest valor determinarà la longitud de l'aresta dels triangles que es generaran per defecte. En zones que no s'especifiqui una altre cosa, el triangle tindrà aquesta longitud d'aresta.

Pel següent exemple utilitzem els següents valors.



Font: BLUE KENUE

A continuació fent corre el generador obtenim la següent malla.



Font: BLUE KENUE

El resultat és una malla completament regular, on la mida del triangle es manté gairebé constant per tot el domini.

### III. Incorporar faralló.

La malla generada anteriorment és incompleta tenint en compte la geografia real. Observant el perfil de la costa de la zona de treball, es troba el Faralló de Cala Gat just a l'inici del Cap de Capdepera.

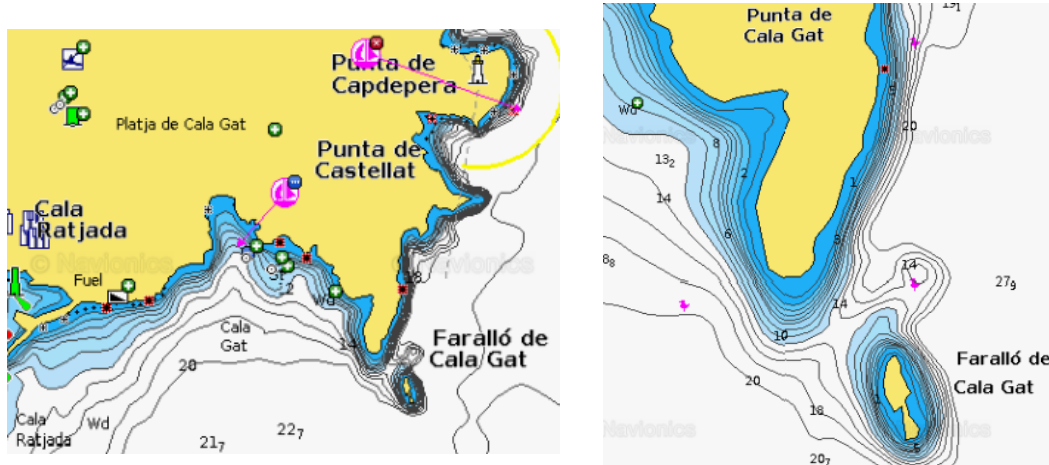
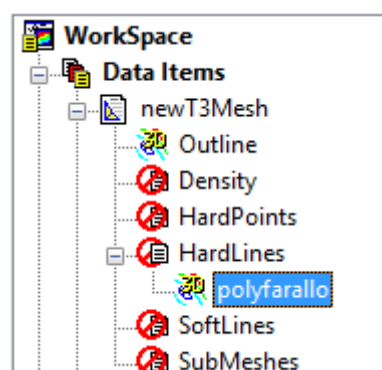


Fig 26. Situació geogràfica del Faralló de Cala Gat. A la esquerra en pla general, a la dreta detall específic. (Font: Navionics WebApp).

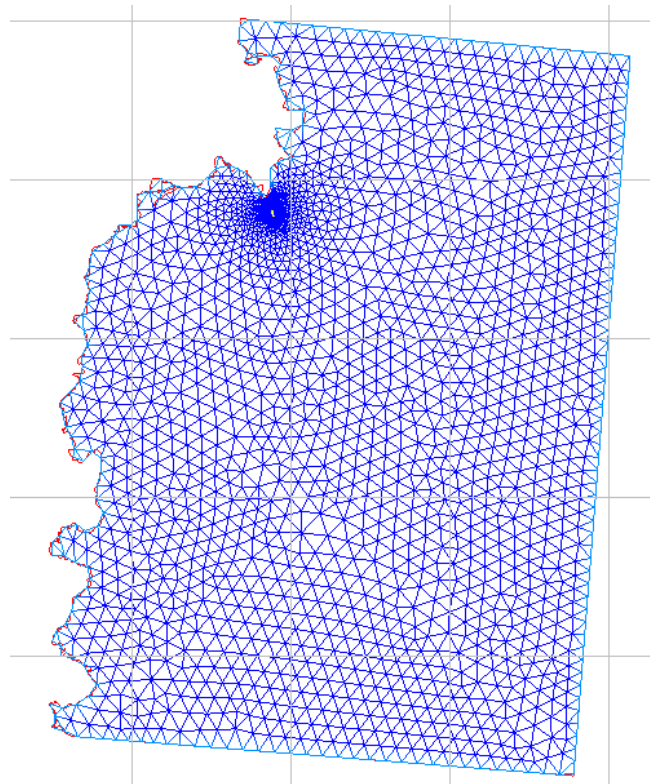
Com es pot veure, el Faralló de Cala Gat és una petita illa just a la punta de Cala Gat. Es pot entendre perfectament que donada la seva posició pot tenir una influència directe als temporals que tinguin una orientació del est. No considerar el Faralló com un element rellevant en el estudi de la propagació de les onades cap al port seria un error.

El domini que es pot incorporar al "Outline" només admet un sol polígon tancat. Per això cal incorporar el Faralló per separat. El primer que farem es dibuixar el polígon que descriurà el Faralló de Cala Gat. Mitjançant la eina de creació de polígons i a partir de les imatges que podem extreure de les cartes de NAVIONICS, generem el polígon que serà el Faralló.

A continuació cal incorporar el Faralló dins del procés de generació de la malla. El Faralló es defineix com una petita illa, i de cara a la propagació de les onades, actua com a un mur o polígon rígid. Per això, incorporarem el Faralló dins del desplegable "HardLines". Els arxius que estiguin dins d'aquest desplegable s'entendran com a línies rígides, i que no permetran la propagació de la onada a través d'ella. Pel cas d'un polígon, l'espai tancat que queda dins seu serà un espai que quedarà fora de la triangulació en la generació de la malla.



Generant la malla amb aquesta incorporació obtindrem el següent resultat.



Font: BLUE KENUE

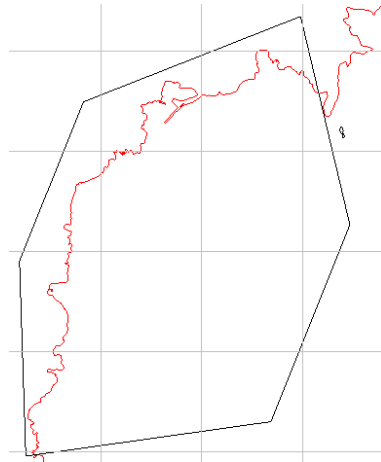
Als voltants del Faralló s'ha generat una progressió radial del creixement de la mida dels triangles. A prop del Faralló s'han generat triangles petits, donat que el polígon te molts costats, aquests són d'una mesura molt petita, comparada amb el valor per defecte determinat. A més, a prop del faralló es donaran molts canvis en la propagació de la onada, i amb una malla mes fina al seu voltant es podrà obtenir uns valors mes específics.

#### IV. Afinar la malla a partir de la densitat.

Per ara la malla és correcte geogràficament. Però cal ajustar i afinar la malla de cara a l'estudi que volem realitzar. Recordant el que s'havia dit anteriorment, per a optimitzar la malla de treball, intentarem augmentar el nombre de triangles per unitat de longitud en zones properes al port, i obtenir triangles més grans per zones llunyanes a la zona d'estudi.

Per a definir aquestes diferències, utilitzarem el desplegable “Density”. Amb aquest desplegable podem incorporar arxius que defineixin la mida dels triangles en cada zona. El procediment és molt senzill.

- I. Creem un polígon tancat allà on volem variar la mida de les arestes dels triangles a generar. Recordar que per defecte ja tenim un valor d'aresta del triangle, i que per tant només variarem la mida del triangle a la zona que especifiquem.



- II. Definim la longitud de la aresta del triangle que volem generar dins del polígon que hem creat. Dins del requadre “Value” definirem la longitud de la aresta, en metres.

Query

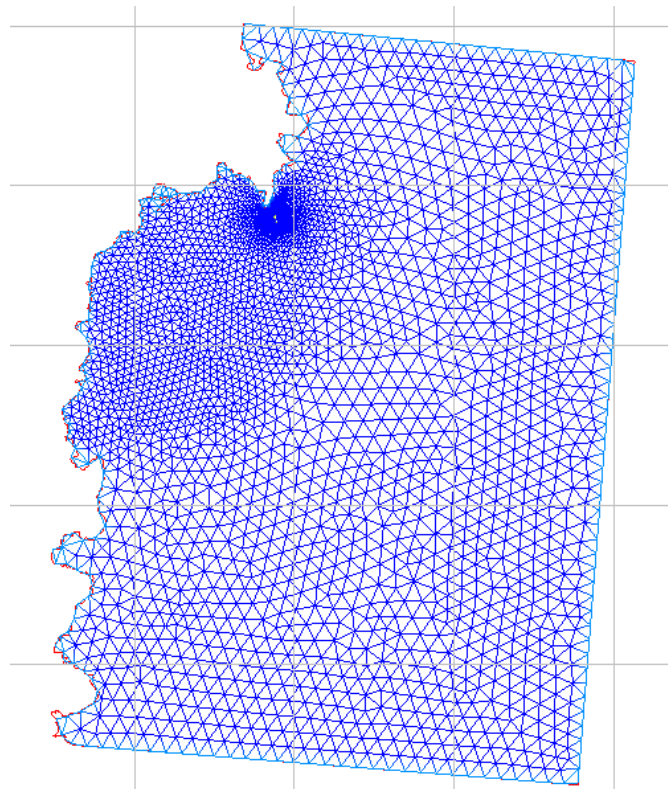
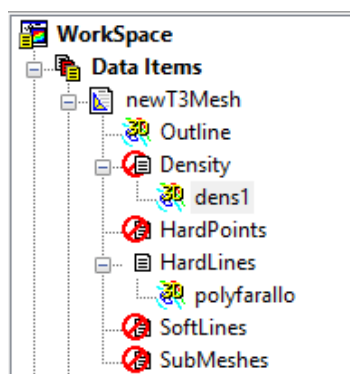
Please enter information for:  
this new Closed Line

Name

Value  Units

OK Cancel

- III. Incorporem el polígon creat dins del desplegable de “Density” i executem el



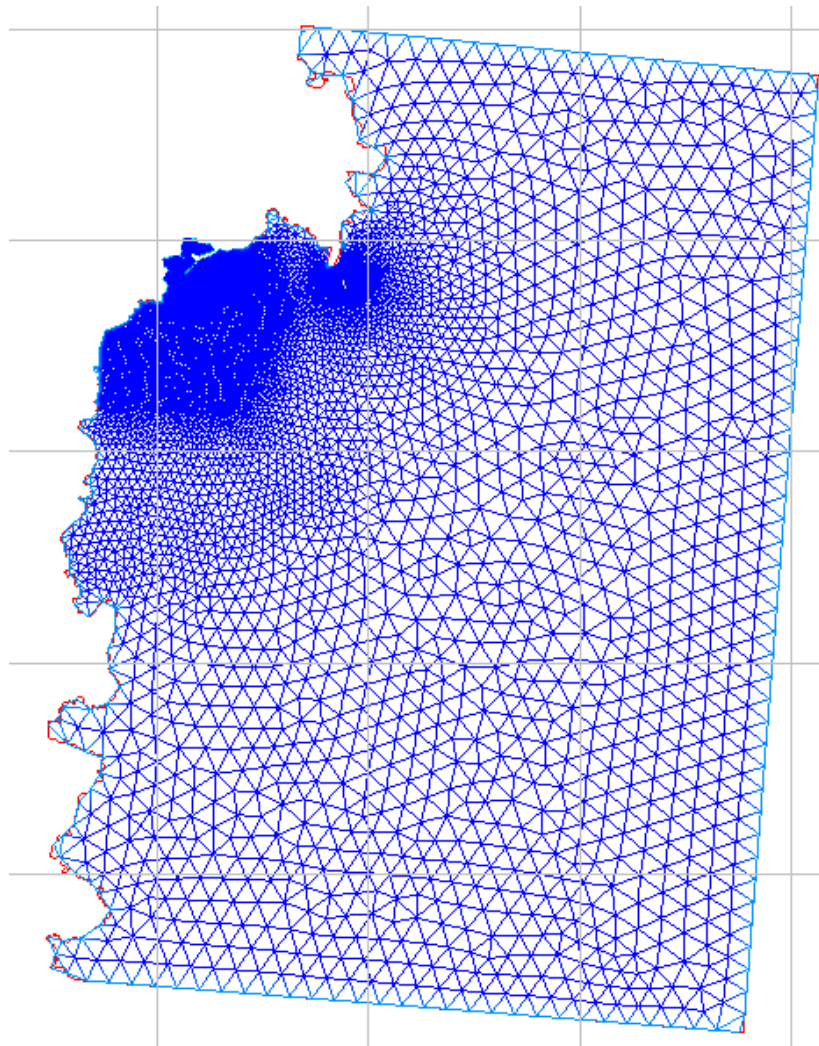
Font: BLUE KENUE

generador normalment.

Com podem veure, per a la zona definida, els triangles que s'han generat són més petits, definint més punts de càlcul dins d'aquesta zona.

Però aquesta densitat no és suficient afinada per a l'objectiu d'aquest estudi. Així doncs a continuació es vol generar una escala de polígons, cercant els seus límits el port de Cala Ratjada, donant per a cada polígon un valor menor per a la aresta dels triangles. L'interès en generar aquesta escala de densitats es la d'optimitzar al màxim la malla. Si només generéssim un nivell de densitat, amb un valor de mida de triangle molt petit, obtindríem molts triangles i per tant molts punts de càlcul. Aquest fet portaria a tenir simulacions de durades molt llargues, i calculant una gran quantitat de valors innecessaris.

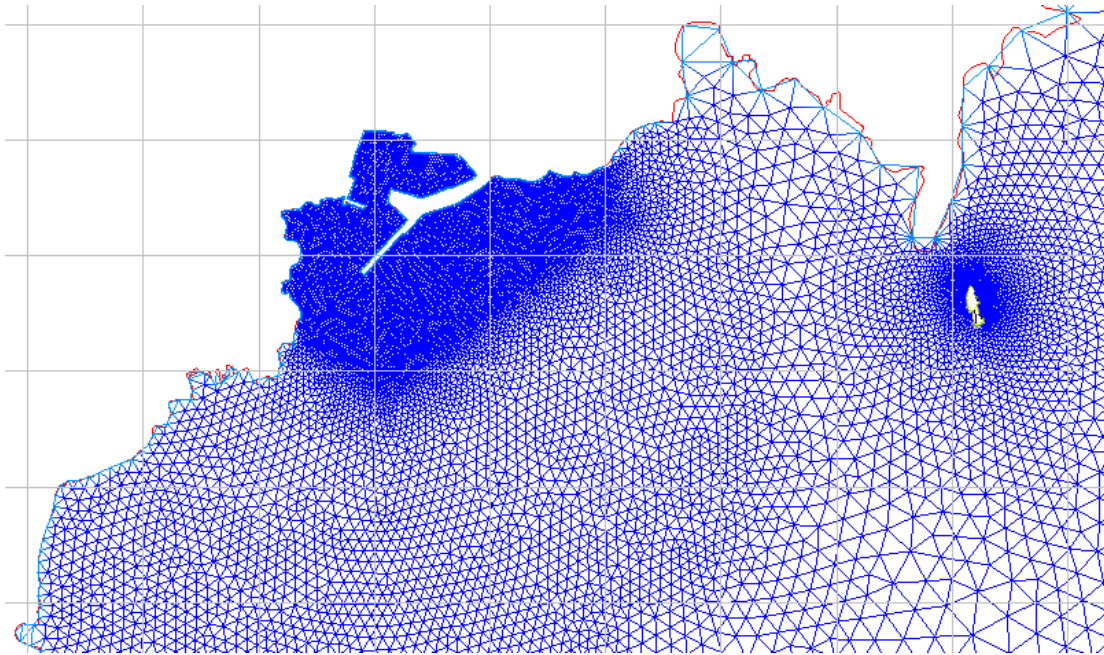
El resultat que es desitja és obtenir una malla de 3 metres d'amplada de triangle per la zona més propera al port. Finalment s'incorporen dos polígons més per acabar de afinar la malla. Un primer que cerqui el espai contingut entre Sa Pedruscada i Cala Gat, amb una mida de triangle de 15 metres.



*Fig 27. Malla tenint en compte els dos primers nivells de densitat. (Font: BLUE KENUE).*



El segon i últim polígon serà concret per la zona del port, amb una mida de triangle de 3 metres.



*Fig 28. Detall de la malla generada a la zona més propera al port i triangles més petits. (Font: BLUE KENUE).*

La malla que resulta de aplicar tots els criteris de densitat i aplicant el domini convenient serà la malla amb la que treballarem per a fer la simulació de la propagació. El resultat final és correcte, ja que compleix amb els criteris de variació de gruix que havíem establert inicialment.

#### V. Interpolació, incorporació de la batimetria al mallat.

Fins ara em parlat de com generar i crear una malla mitjançant el pre-processor BLUE KENUE. Aquesta malla, tal com hem vist, està definida segons el estudi que hem de realitzar, tenint en compte la geografia d'estudi, les zones d'anàlisi post simulació i el gruix que desitgem a cada punt. Però, en ningun moment s'ha incorporat els valors de la batimetria que s'ha creat anteriorment, es a dir, aquesta malla només existeix en el pla horitzontal, no té profunditat.

En aquest punt incorporem els valors de la batimetria a la malla creada. El resultat que desitgem obtenir, és una malla defineixi el fons marí per a la zona del domini.

Utilitzant el BLUE KENUE incorporarem els valors de la profunditat de la batimetria a la malla ja generada. En primer lloc haurem de carregar el arxiu que conté els punts corresponents a la batimetria generada amb el AutoCAD. El BLUE KENUE ens permet treballar amb els dos arxius, la malla i els punts, alhora i posar-los en comú si ens interessa. Per poder importar l'arxiu de punts, és necessari que aquests sigui un arxiu de coordenades (.xyz). Alhora de importar el arxiu de punts de la batimetria, ho farem com un arxiu de text (.txt) per poder-lo manipular amb el editor de text o també amb el Excel. Caldrà ordenar les coordenades per tal de que quedi en ordre X,Y i Z, i separat per columnes. Finalment guardarem el arxiu amb la extensió desitjada (.xyz).



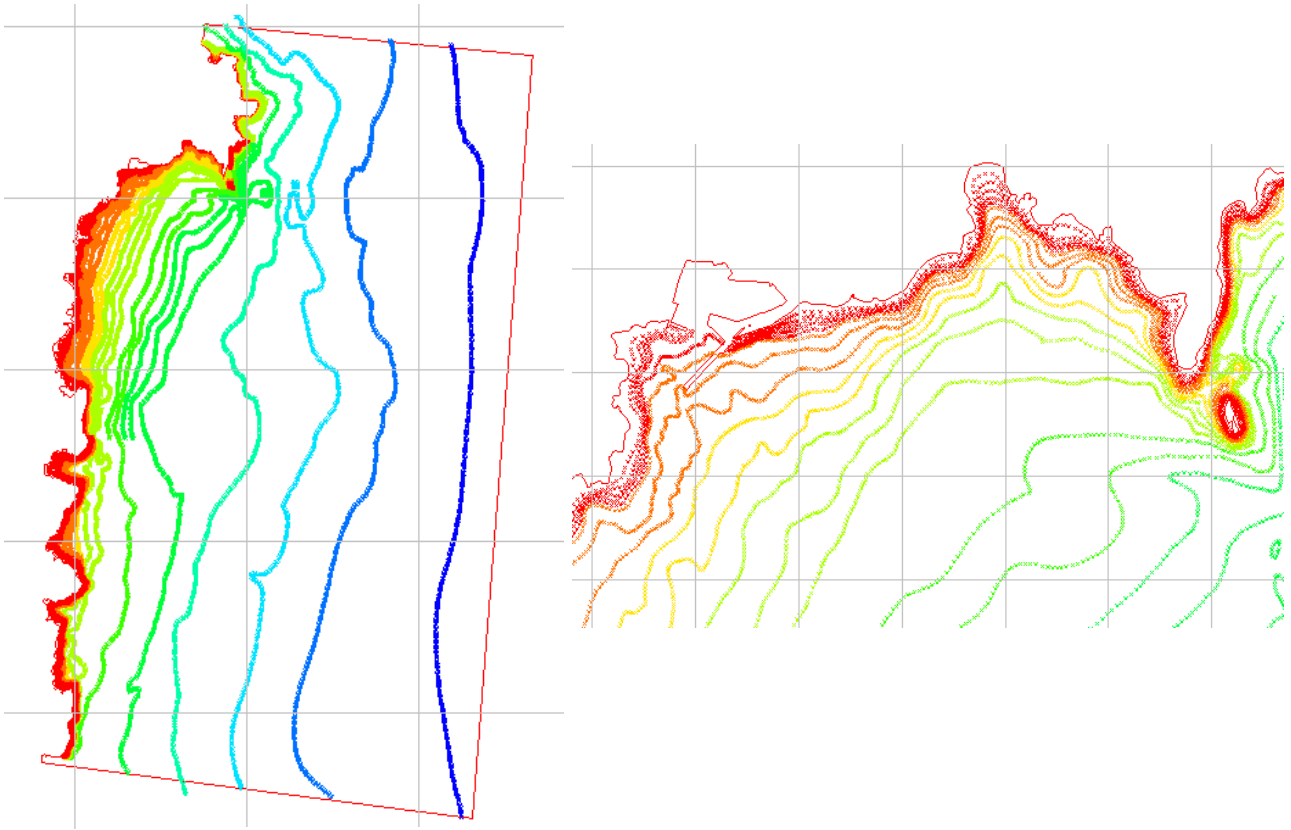


Fig 29. A l'esquerra els punts de la batimetria pel domini general mitjançant BLUE KENUE.  
A la dreta, detall de la zona del port dels punts de la batimetria.

Un cop incorporat els punts de la batimetria generada, interpolarem aquests punts amb els nodes de la malla creada.

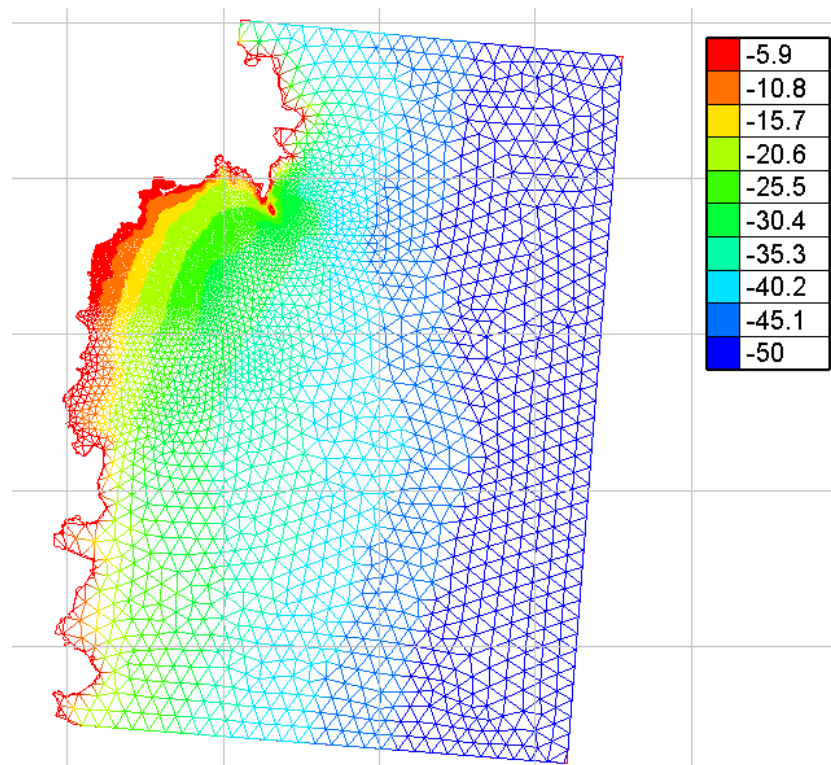


Fig 30. Malla un cop realitzat la interpolació. Escala de colors per a definir els diferents valors de cota de profunditat. (Font: BLUE KENUE).

Utilitzant l'eina d'interpolació que ens ofereix el mateix programa de BLUE KENUE, posarem en comú els valors dels punts amb la malla. Amb aquest procés de interpolació el que aconseguim és calcular la cota de profunditat que es troba cada node de la malla, tenint de referència els punts batimètrics. Per això segons la posició dins de cada node del pla, s'interpolerà la seva cota tenint en compte els valors de batimetria més pròxims. Fent el mateix procediment que es faria per a realitzar una interpolació en dos dimensions. Per ara, cada node estarà descrit segons tres coordenades (x, y i z), però sense especificar que aquest valor z sigui explícitament la profunditat.

#### VI. Creació del arxiu de batimetria.

Fins ara tenim la malla creada dins del nostre domini, amb les especificacions que em decidit, i finalment amb els valors de la batimetria generada amb el AutoCAD. Però, queda especificar que aquesta malla creada representi el fons marí del domini creat.

El mateix programa utilitzant fins ara, el BLUE KENUE, és un pre i post processador pensat per a simular i representar estats del mar i zones marines. Una de les eines que presenta, és la creació d'objectes de tipus Selafin. Amb aquesta eina, el que aconseguim és determinar la categoria que volem donar a la malla creada anteriorment. S'entén per categoria aquelles variables característiques per a determinar el estat del mar, com pot ser, la profunditat, la força del vent en el pla horitzontal, l'estat de la superfície lliure, la velocitat de les onades en el pla horitzontal y la fricció que presenta el fons marí.

En el cas que estem treballant, utilitzarem el objecte Selafin per a determinar que la malla creada representa el relleu del fons marí. Afegirem la malla creada dins del nou objecte Selafin que hem creat. En aquest moment ens permetrà afegir una nova variable. Per poder representar la batimetria, afegirem una nova variable de categoria BOTTOM dient que es mantinguin les dades de la malla ja creada.

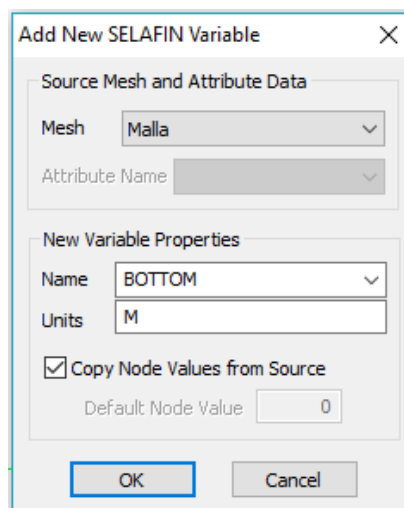
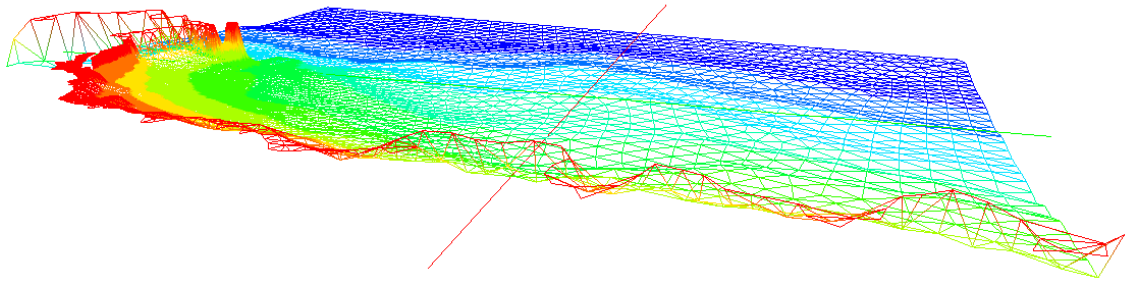
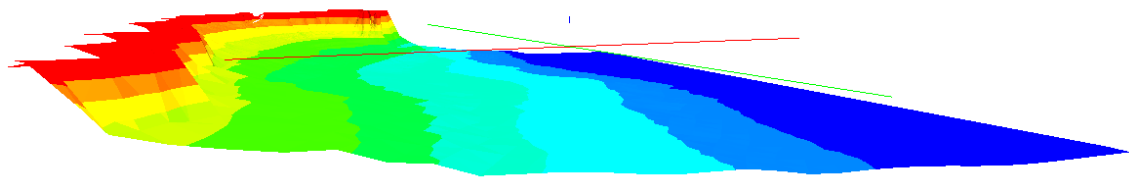


Fig 31. Quadre per afegir una variable al objecte SELAFIN. (Font: BLUE KENUE).

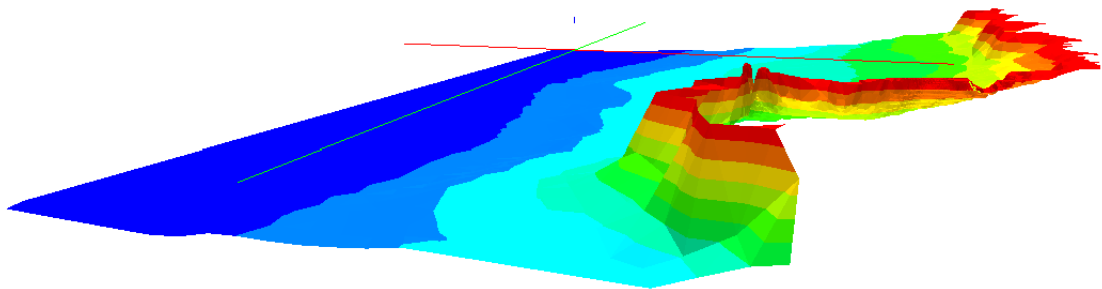
En aquest punt es genera una nova malla amb la nova variable incorporada de nom BOTTOM. Amb això es verifica que el que ha quedat definit és el relleu del fons marí, i per tant cada node esta caracteritzat en les seves 3 coordenades. Els resultats que podem obtenir no s'aprecien en la visualització en 2D, però si en la visualització 3D.



*Fig 32. Visualització 3D de la batimetria amb BLUE KENUE. Vista des de zona de costa en direcció est.*



*Fig 33. Visualització 3D de la batimetria amb BLUE KENUE. Vista des de zona sud-oest.*



*Fig 34. Visualització 3D de la batimetria amb BLUE KENUE. Vista des de zona nord.*

Finalment ja tenim generat la malla que representa el fons marí i que anomenarem com a batimetria. Un cop es vulgui executar la simulació de propagació d'onades, aquest serà el arxiu geomètric que representarà el nostre espai de treball i les seves condicions característiques. Per la seva utilització amb el programa TOMAWAC guardarem l'objecte SELAFIN amb l'última variable afegida.

#### 2.3.2.4 CONDICIONS DE CONTORN

Aquest és un apartat complementari de generar la batimetria. La funció principal del procés que correspon aquest apartat és la de definir les condicions del contorn del espai de treball. Per tant en aquest apartat no es posen valors característics que defineixin el nostre estat de mar, sinó que complementa el espai de treball que hem generat posteriorment.

Per atribuir una categoria als contorns del domini utilitzarem el mateix programa que hem utilitzat per a generar la batimetria, el BLUE KENUE. Aquest programa ens ofereix una eina

especifica per atribuir aquestes condicions, eina que es pot trobar com a “Boundary Conditions (Conlim)”. Tal com diu el seu nom, la seva funció és la de caracteritzar les condicions límit o de contorn.

Per atribuir les condicions de contorn mitjançant BLUE KENUE, un cop obrim un nou arxiu “Conlim”, s’haurà de escollir de quina malla es vol determinar el seu contorn. Visualitzant el arxiu de condicions de contorn amb la malla triada, aquesta es veurà tot en gris, i només es podrà manipular el contorn. Per a determinar la condició de contorn a cada punt, es seleccionarà aquell segment que es vulgui determinar, i escollirem la opció de afegir segment de contorn, i ens permetrà determinar la seva categoria. Segons la categoria atribuïda, cada contorn tindrà un color diferent.

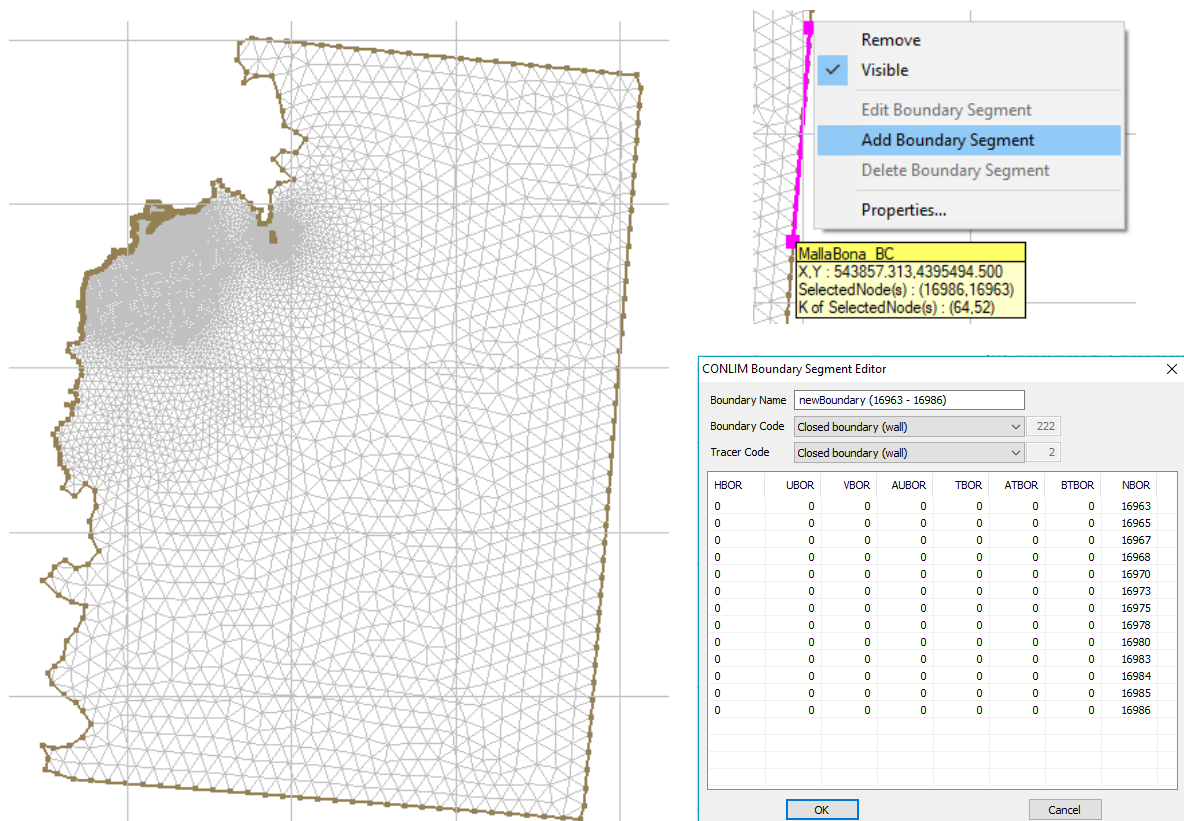


Fig 35. Esquerra: arxiu de condicions de contorn obert amb BLUE KENUE. Dreta amunt: exemple de com afegir contorn. Dreta sota: quadre per determinar el tipus de contorn.

Pels contorns del nostre domini es poden donar 3 categories diferents. A continuació s’exposen aquestes categories, i com atribuir-les mitjançant BLUE KENUE.

#### IV. Límit rígid.

Es considera un límit rígid aquell que respon igual que una zona costanera o un mur. En termes de condicions marítimes, es aquell límit que no permet la propagació de la onada. Es consideraran límits rígids tot el contorn que correspongui a zones de costa,

obres marítimes per sobre del nivell del mar i illes. Cal tenir en compte que per aquest projecte cal especificar el Faralló de Cala Gat com a límit rígid.

Per atribuir aquest tipus de contorn amb BLUE KENUE, atribuirem un valor concret en el codi de contorn. Per aquest cas el seu valor serà el 2. Un cop atribuït el valor, es podrà visualitzar el contorn de color gris.

V. Límit de superfície lliure.

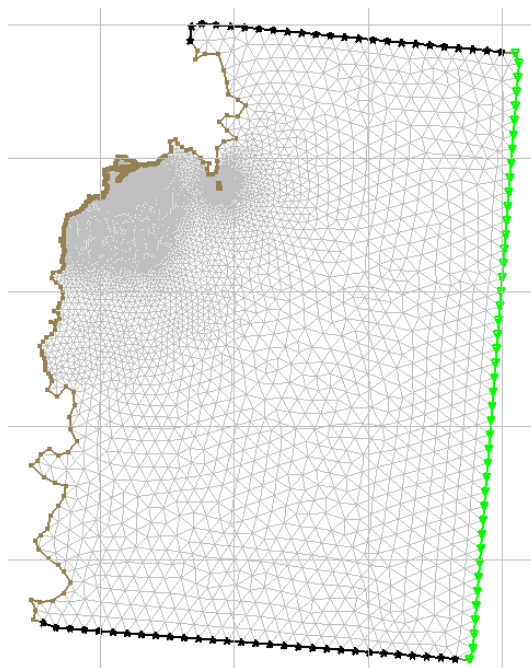
Considerarem superfície lliure quan el límit correspongui a una zona del mar on les onades es poden propagar normalment, però que no són l'origen d'elles. Per tant es podrà determinar un estat inicial d'aquest límit, però la seva evolució serà conseqüència de la propagació d'onades des d'un altre límit.

Per aquest tipus de límit, atribuirem el codi de valor 4 dins de BLUE KENUE. A l'hora de visualitzar-ho aquest límit es tornarà de color negre.

VI. Límit corresponent a la incidència d'ones.

Aquell límit per on voldrem començar la simulació i enviar el nostre tren d'onades, el considerarem límit d'incidència d'onades. Definint aquesta categoria, en el moment de realitzar la simulació, TOMAWAC prendrà aquest límit com el origen de les onades, que estaran definides en alçada d'ona, període i direcció.

Aquest límit correspon al codi de valor 5 al BLUE KENUE. En visualitzar, aquest límit serà de color verd.



*Fig 36. Domini general aplicat les condicions de contorn. (Font: BLUE KENUE).*

Així queda el resultat d'aplicar les condicions de contorn al nostre domini. Finalment guardarem el arxiu CONLIM que conté les dades de condicions de contorn en el seu format (.cli). En cas de variar la malla generada per la batimetria (mes fina, generar mes nodes,...), tot i no variar el contorn exterior, igualment s'haurà de generar un nou arxiu CONLIM, ja que es té en compte el nombre de nodes, i no el segment que forma.

### 2.3.2.5 CONDICIONS DE SIMULACIÓ

L'últim pas que ens queda per a reproduir la simulació de l'espai determinat, és definir les condicions de temporal que generaran un tren d'onades, i que en definitiva és el que estudiarem.

El que farem per definir aquestes dades del temporal que volem crear, es generar un arxiu de lectura, en un format concret (.cas) i que contindrà totes les característiques d'aquest temporal. A més a més, aquest arxiu serà fàcilment modificable, per tal de ajustar la simulació de la manera més adequada. Per a generar aquest arxiu de condicions de temporal, utilitzarem un programa específic per aquesta funció, el FUDAA PREPRO. Aquest programa serveix de preprocessador dels programes de models numèrics dins del paquet de TELEMAT 3D on trobem el programa TOMAWAC, utilitzat específicament per aquest estudi. Aquest programa ens permet realitzar tots els passos previs realitzats fins ara (mallat i condicions de contorn), i per altre banda, crear el arxiu de condicions de temporal.

De les variables a definir per a caracteritzar el temporal a simular, podem distingir diferents grups de variables, i descriuran diferents parts de la simulació.

#### 2.3.2.5.1 CARACTERITZACIÓ DEL MAR

En aquest grup s'exposen les variables físiques que defineixen el temporal. Són 3 les variables que definiran el estat físic del mar, la direcció ( $\theta$ ), el període de pic ( $T_p$ ) i l'alçada d'ona ( $H_s$ ). A continuació s'exposa els valors que s'han utilitzat i el perquè. Concretar abans però, que es presenten dos grups diferents entre aquestes variables, les condicions inicials, i les condicions als límits. Les condicions als límits són les que es donaran pel límit d'incidència d'onades un cop comenci la simulació. Es prendrà la situació que partim d'un estat inicial de repòs, i que en començar la simulació es donarà un tren d'onades en propagació cap al port.

Per especificar que tenim un estat inicial en repòs, dins de l'arxiu de condicions caldrà introduir les variables que determinaran aquest estat inicial de repòs de l'estat del mar. Principalment caldrà determinar que l'alçada d'ona inicial es 0, per tant:

*INITIAL SIGNIFICANT WAVE HEIGHT = 0*

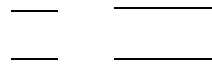
D'aquesta manera partirem del repòs, i en introduir una onada amb una certa direcció, es podrà estudiar correctament la seva propagació.

Per tant, els valors que es comenten a continuació faran referència a les condicions al límit.

##### 2.3.2.5.1.1 ALÇADA D'ONA

Amb aquesta variable definirem la alçada que tindrà la onada en el límit del nostre domini. Aquesta onada es propagarà en direcció al port, i a mesura que vagi avançant, evolucionarà modificant la seva alçada d'ona, tal com s'ha vist anteriorment a la explicació de la propagació. Justament si observem les formulacions utilitzades per a calcular el coeficient de refracció (KR), que especificarà el valor d'alçada d'ona allà on desitgem, trobem que el valor d'alçada d'ona es irrellevant per a calcular aquest

coeficient. Es a dir, que per un mateix període, el valor de  $K_R$  en una profunditat determinada, serà el mateix per a totes les alçades d'ona possibles.



Tenint en compte aquest concepte es decideix prendre com a valor d'alçada d'ona al límit d'1 metre. Un cop feta la simulació els resultats que obtinguem d'alçada d'ona en tot el domini equivaldran als valors que pren el coeficient de refracció en aquell punt determinat un període concret.

D'aquesta manera, una sola simulació servirà per a tots els casos d'alçada d'ona que es puguin donar.

#### **ALÇADA D'ONA SIGNIFICANT AL LÍMIT = 1 METRE.**

##### **2.3.2.5.1.2 PERÍODE DE PIC**

La variable més rellevant per a descriure i definir una onada i la seva evolució és el període de pic. La resta de variables que poden descriure una onada estan en funció del període de pic, i per això aquesta variable agafa una rellevància vital. El que determinarem a continuació és el període de la onada incident just al límit. Segons aquest període es podrà determinar la longitud d'ona i la celeritat de grup que caracteritzaran la evolució de la onada durant la seva propagació.

Escollirem el valor del període de pic tenint en compte l'alçada d'ona de disseny, calculada anteriorment, en aigües profundes. Donant un cop d'ull, segons la alineació on calculem, tenim un valor d'alçada d'ona diferent, i per tant generaran un període de pic diferent. Però com la diferència és mínima entre ells, es calcularà el període de pic de la mitja de les alçades d'ona.



Tal com s'ha comentat en anteriors apartats, calcularem el període de pic segons la relació determinada entre període i alçada d'ona. Recordem que aquesta relació s'ha calculat tenint en compte les dades que s'obtenien a la boia de Capdepera, y que només correspon per aquella profunditat, o en un altre cas, per tot el límit del domini. Aplicant aquesta relació per l'alçada d'ona mitja, trobem el període mig de treball per la simulació.

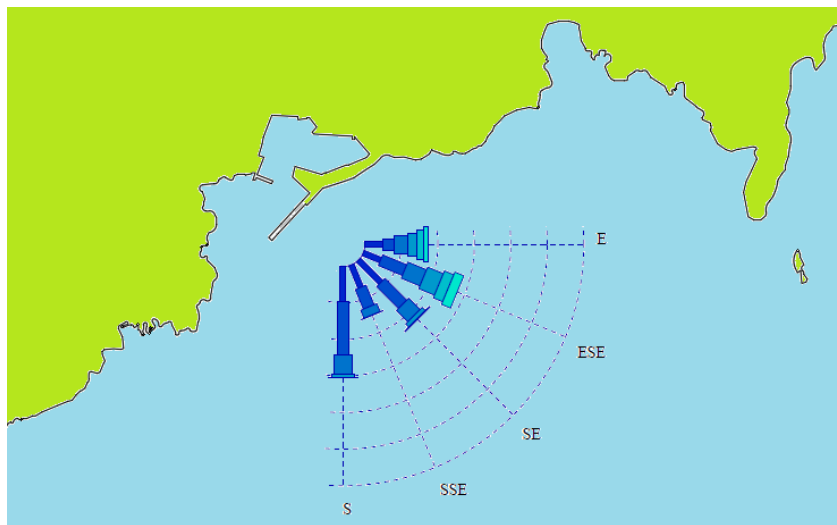
Però, el software de Tomawac treballa en freqüència i no en període. La conversió és molt senzilla, però cal tenir en compte el canvi per a procedir al càlcul.



### 2.3.2.5.1.3 DIRECCIÓ

Aquesta és la última variable a determinar per a definir una ona onada correctament. Tenint en compte el objecte d'aquest estudi, pel que fa a la direcció, s'escollirà aquella que generi una situació més desfavorable cara a l'ultrapassament.

Històricament, les direccions que han presentat més problemes d'ultrapassament i han impedit el correcte servei de les instal·lacions portuàries, han sigut els temporals de llevant. Però, observant la posició del port i l'orientació d'aquest, es pot arribar a pensar que altres direccions poden presentar problemes iguals o pitjors. Per això, pel que fa a la direcció, s'han pres fins a 5 direccions de procedència per a representar un temporal.



En la figura que es mostra, es pot veure gràficament quines són les direccions que tenen una incidència més directa amb el port de Cala Ratjada. Per incidència més directa s'entén que la orientació de les onades en aigües profundes traça una perpendicular amb el dic exterior del port. Com s'ha vist anteriorment, una onada sotmesa a una variació angular de la seva direcció, aquesta patirà una disminució en l'alçada d'ona, es a dir, tindrà un valor del coeficient de refracció menor.

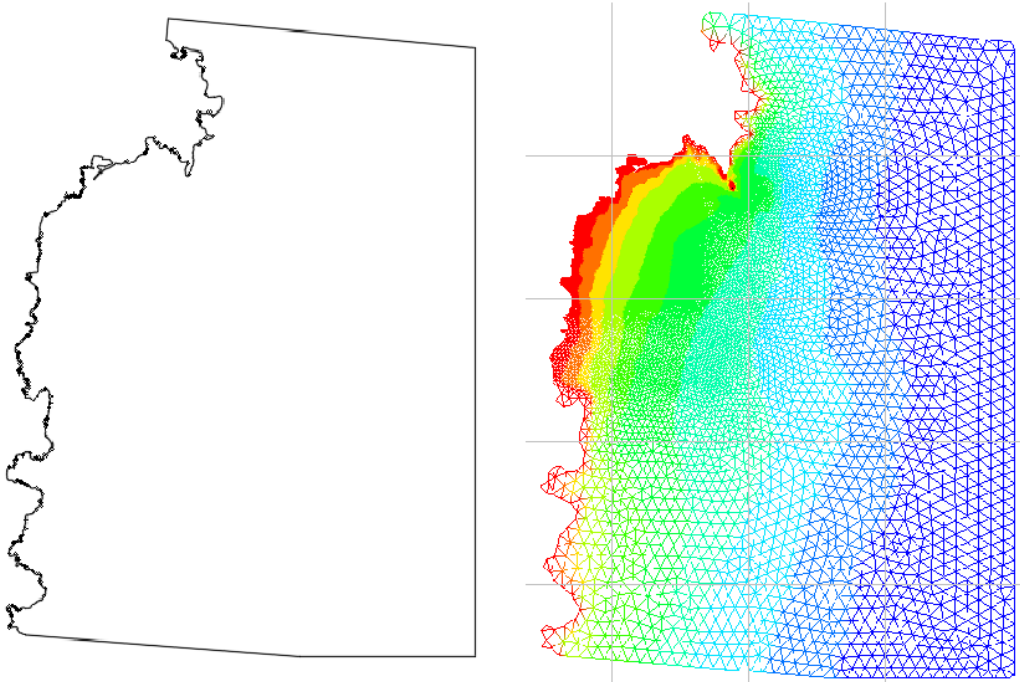
Per tant, s'observa que es destaquen 5 direccions principals, des de l'est fins al sur. Tenint en compte que per direccions més al nord de l'est, el faralló de Cala Gat protegeix la badia de Cala Ratjada. I per altre banda, si ampliïem la vista, el Cap Vermell també serveix de protecció per onatges més al oest.

De cara a estudi, això implica generar una simulació amb cada direcció, ja que en cada un d'ells s'ha de crear un domini específic per a cada direcció, i per tant, una malla i condicions de contorn específic per a cada domini. Serà necessari fer aquest canvi per orientar el límit de la malla per on incideixen les onades, just paral·lel a les crestes de les onades en cada direcció.

Fig 37. Direccions principals i freqüència de cada un d'ells segons intensitat. (Paint)

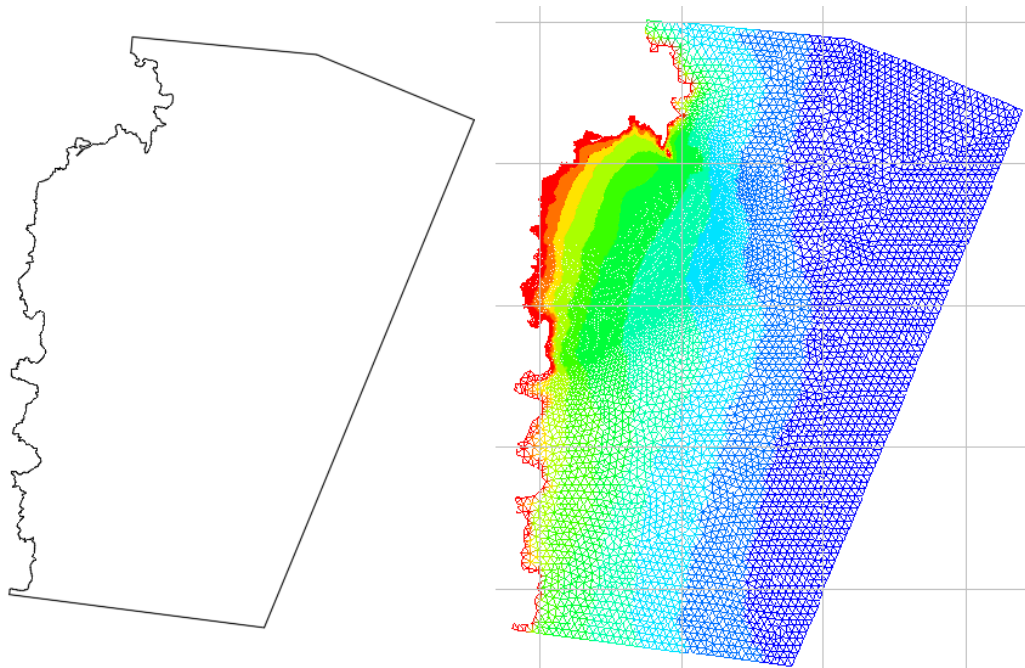
A continuació es presenten les malles generades i utilitzades per a executar cada simulació segons direcció. Per a la creació dels dominis, s'ha partit del domini general creat amb AutoCAD. Primer s'ha ajustat la direcció del límit per on incideixen les onades, i a posterior la resta de límits. Les malles també s'han creat seguint les pautes especificades anteriorment, amb els mateixos espais de densitats. Els resultats són els següents.

EST (dir.  $270^{\circ}$ )



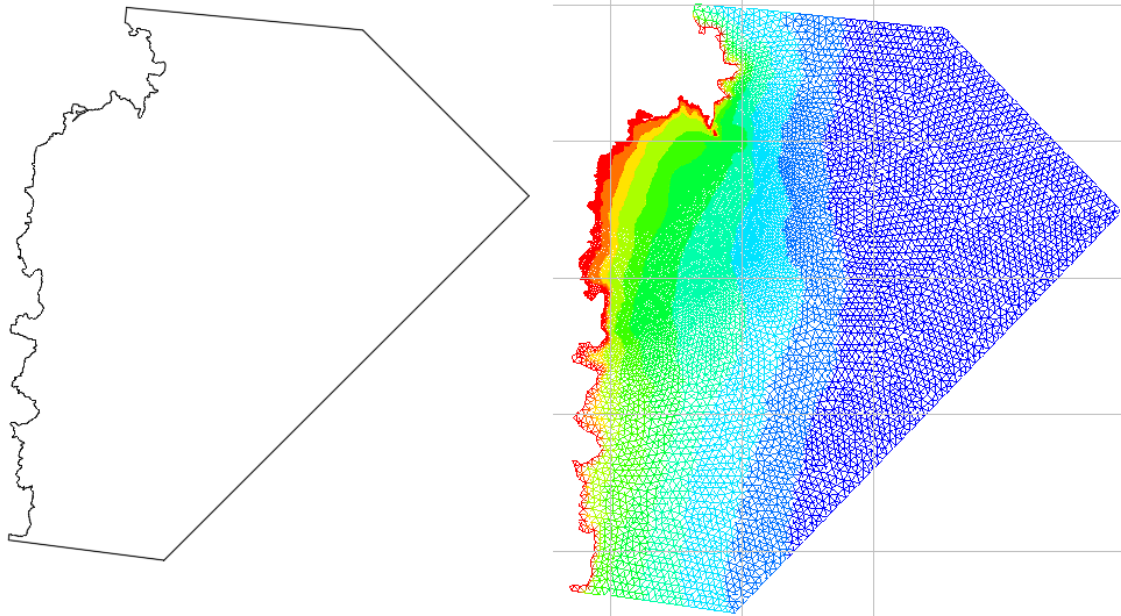
Font: AUTOCAD i BLUE KENUE

EST-SUR-EST (DIR.  $292,5^{\circ}$ )



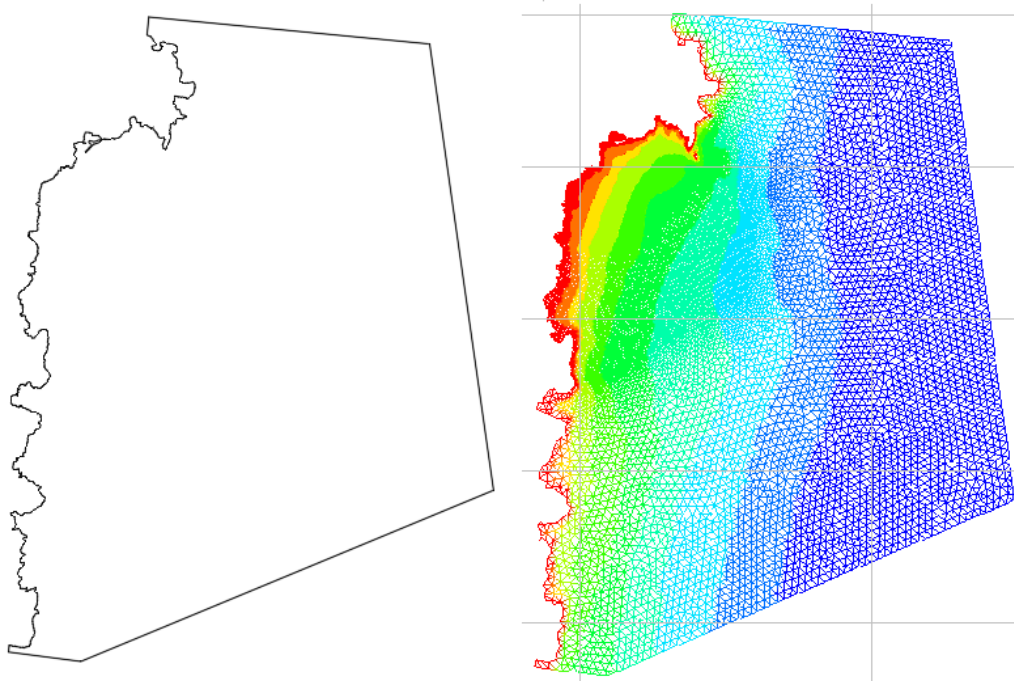
Font: AUTOCAD i BLUE KENUE

SUR-EST (DIR. 315<sup>0</sup>)



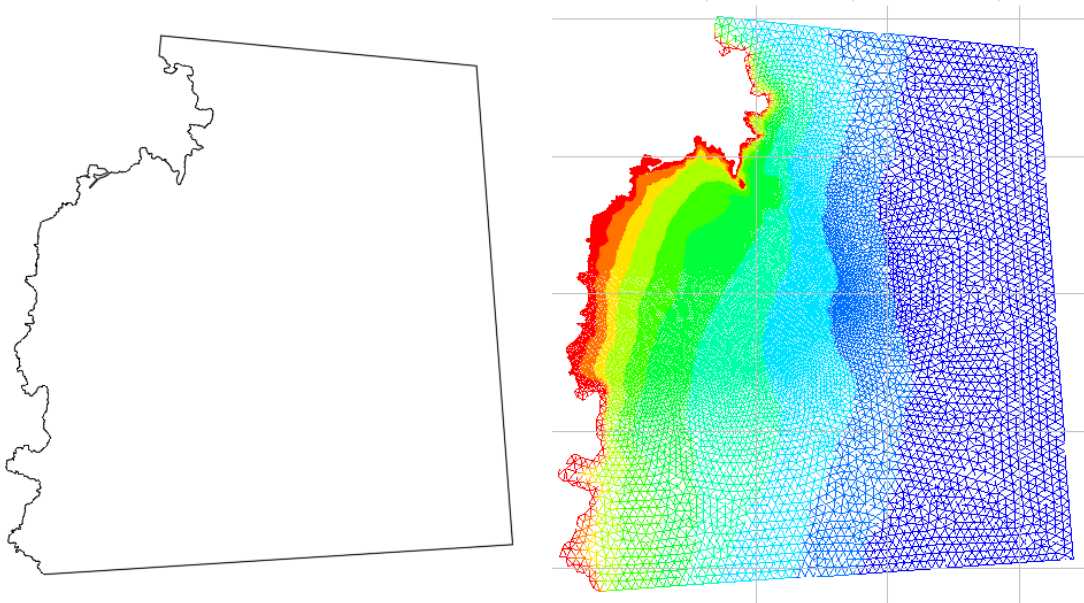
Font: AUTOCAD i BLUE KENUE

SUR-SUR-EST (DIR. 337,5<sup>0</sup>)



Font: AUTOCAD i BLUE KENUE

SUR (DIR. 360°)



Font: AUTOCAD i BLUE KENUE

#### 2.3.2.5.2 CARACTERITZACIÓ DE L'ESPECTRE

Per a poder explicar correctament el procediment en la caracterització de l'espectre, cal donar unes pinzellades del tipus de funcionament del model numèric utilitzat per TOMAWAC.

El sistema d'anàlisi que utilitza el model numèric de TOMAWAC, així com la resta de formulacions que es troben dins del grup de TELEMAR-MASCARET, és l'estudi de l'espectre resultant en propagar un tren d'onades. Es a dir, s'estudia el comportament d'un tren d'onades que es desplaça per un pla.

En primer lloc posem l'exemple d'una ona monocromàtica, aquella representada per un sol període. El que ens interessa conèixer d'aquesta ona és el comportament de la superfície lliure, en quina posició es troba en funció del temps. Per tant, la fórmula a estudiar per una ona monocromàtica, estarà en funció de la posició (x,y), el temps transcorregut (t), el període, o per TOMAWAC la freqüència (f) i per última la direcció.

Aquesta fórmula representa el comportament de la superfície lliure d'una onada en funció de les variables especificades. El problema que es pot trobar per una onada monocromàtica és que el resultat sigui de caràcter sinusoidal, sense obtenir màxims d'alçada d'ona per tot el seu espai.

L'espectre d'un tren d'ones es defineix com la gràfica de la suma de totes les ones, tenint en compte únicament el valor màxim de totes les ones per al mateix temps i mateix punt dins de l'espai. D'aquesta manera s'entén la necessitat de generar un gran nombre de onades diferents, i que el seu comportament per un mateix punt sigui diferent entre ells, però alhora, real i possible. De tal manera que el valor que s'obtingui pugui representar un cas real d'una onada.

Quan TOMAWAC representa un espectre del estat del mar, el que estudia és la densitat de la variància direccional del espectre.

Com es pot veure, el càlcul de la densitat direccional està en funció de la direcció i la freqüència de la onada. El que es planteja és l'estudi en cada punt per múltiples freqüències i en totes les direccions. La suma de tots aquests càlculs serà el espectre de la superfície del estat del mar.

El càlcul de la variància de densitat en funció de la freqüència, és mitjançant la formulació de JONSWAP. Aquesta és una formulació específica pel càlcul de densitat de una onada amb una certa alçada i segons una determinada freqüència.

— — — — —

D'altra banda, la caracterització de les direccions de càlcul s'efectuarà mitjançant la següent fórmula. L'espectre en cada node de càlcul del nostre espai de treball és calcularà en una direcció determinada, o com s'ha dit anteriorment, en moltes direccions i prenen el valor màxim resultant.

— — — — —

Per a caracteritzar correctament l'espectre mitjançant TOMAWAC caldrà definir les següents variables.

#### 2.3.2.5.2.1 VARIABLES

##### VII. TIPUS D'ESPECTRE DIRECCIONAL AL LÍMIT.

Aquesta variable defineix quin tipus de formulació es tindrà en compte per a calcular l'espectre del estat del mar. Es poden determinar fins a 7 tipus d'espectre direccional, i la diferència entre cada tipus resideix amb les formulacions que s'utilitzen i quines són les variables que admeten. Aquestes característiques es poden trobar dins del Manual de funcionament de Tomawac (*Tomawac Operating Manual*).

Per al present projecte, basant-nos en les característiques determinades anteriorment sobre les fórmules utilitzades de JONSWAP i per altre banda utilitzant com a referència les components de direccionalitat i freqüència relativa, s'escull la tipologia 6, i queda especificat al document de la següent manera.

**TYPE OF BOUNDARY DIRECTIONAL SPECTRUM = 6.**

##### VIII. NOMBRE DE FREQÜÈNCIES.

Com s'ha comentat anteriorment, per a definir més acuradament el espectre representatiu del nostre estat del mar, caldrà simular diferents trens d'onades amb una freqüència diferent per cada un. En aquest apartat és defineix la quantitat de freqüències que es tindran en compte. Les recomanacions per a generar una espectre mínimament definit, es la de generar freqüències des de el 0.04 Hz fins els 0.5 Hz (o

dels 2 als 25 segons en termes de període). TOMAWAC genera les diferents freqüències aplicant la següent fórmula.

On  $f_1$  és la freqüència mínima,  $q$  és el factor freqüencial, i  $n$  correspon al número de freqüència corresponent.

Pel treball plantejat, s'ha escollit fer la simulació amb un **nombre de 40 freqüències**. Evidentment, quantes més freqüències, més acurat serà el espectre, però per altre banda, major és el temps de càlcul. Per cada node s'haurà de calcular per cada freqüència.

#### IX. FREQÜÈNCIA MÍNIMA:

La freqüència mínima determinarà, tal com es pot veure en la fórmula presentada al punt anterior, quina serà la menor freqüència possible que es portarà a càlcul. Per aquest cas, donat que estem al mediterrani, es planteja una **freqüència mínima de 0.05 Hz**. Això equival a un període de onada 20 segons, valor adequat pel mar mediterrani.

#### X. FACTOR FREQÜENCIAL:

Aquesta variable determinarà la tendència de la formulació que determinarà el valor de les freqüències. Si s'interpreta que un estat de mar es poden donar freqüències molt variades, augmentarem aquest valor per tal d'obtenir freqüències que englobin tot el camp desitjat, sense haver d'augmentar el nombre de freqüències a estudiar. Pel cas plantejat, amb 40 freqüències diferents a propagar, i un mínim de 0.05 Hz, el factor freqüencial proposat és de  **$q=1.05$** . Amb aquest factor tindrem freqüències des del mínim de 0.05 fins a un màxim de 0.33.

#### XI. NOMBRE DE DIRECCIONS:

Aquesta variable determina en quantes direccions es calcularà el espectre en cada node. Es a dir, per cada node i freqüència es calcularà l'espectre resultant per cada direcció desitjada, i posteriorment només es tindrà en compte un sol valor. La determinació de cada direcció vindrà donada pel nombre de direccions a tenir en compte. El programa dividirà tot l'espai en el nombre de direccions que s'hagi especificat de manera proporcional, i aquestes quedaran definides com les direccions de càlcul. Igual que amb el nombre de freqüències, per més nombre de direccions millor resultat es podrà obtenir del espectre. Però per altre banda, per major nombre de direccions, major càlcul a realitzar, i major es el temps que trigarà en executar cada simulació. Cal pensar que per una simulació completa es pot aproximar el nombre de càlculs a realitzar multiplicant el numero de nodes pels càlculs que s'han de fer per node, es a dir, la multiplicació del nombre de freqüències amb el nombre de direccions especificat.

Pel present projecte s'ha triat un **nombre de 24 direccions**.

Per tenir un control de la quantitat de dades que s'hauran de processar, calculem el nombre de càlculs aproximat que s'hauran de dur a terme per a cada interval de temps de la simulació. El nombre de nodes utilitzat surt de trobar el valor mig del valor de nodes que tenen les malles generades.



Amb aquesta reflexió queda justificat el ús d'aquest programa per a executar la simulació i trobar els valors desitjats.

Aquestes són les variables que definiran l'espectre.

#### 2.3.2.5.3 CARACTERITZACIÓ DEL TEMPORAL I DESCRIPCIÓ DELS RESULTATS

Com a últim apartat per a definir la simulació que volem executar, queda definir la durada que tindrà el temporal i altres variables per definir la representació dels resultats.

Per una banda, com s'ha dit, cal definir el caràcter temporal de la simulació, per tant la durada. Dos variables principals definiran aquest període de temps.

##### XII. L'interval de temps (*TIME STEP*).

Aquest definirà cada quant es procedirà a realitzar el càlcul de l'espectre en tot el espai de treball que hem definit, per tant en tots els nodes de la nostra malla.

Aquesta variable queda definida en segons. És important saber en quines unitats estem parlant, per a generar un temporal suficient però no excessiu en el temps.

Pel present projecte s'ha escollit **un interval de 5 segons**.

##### XIII. El nombre d'interval (*NUMBER OF STEPS*).

Tal com diu el nom, defineix el nombre de intervals en que es composi aquest temporal. En funció dels valors definits queda determinat el temps de execució de la simulació, com a la multiplicació del nombre d'interval pel mateix interval definit. En el present projecte es defineix **un nombre de 600 intervals**.

Per tant la durada de la simulació quedarà.

Concretar que, quant major es el nombre d'interval, major nombre de càlculs a executar per la simulació, i per tant, cal ser precís a l'hora d'escollir l'interval de temps i nombre d'interval. Per, poder decidir quin serà el nombre d'interval més adequat, haurem d'analitzar els resultats que anem obtenint. Per això, es recomanable generar una malla mes grollera en primer lloc per a definir els valors de caracterització de l'espectre i de l'interval de temps que tingui la simulació.

Cal entendre que, per la simulació proposada, el que generem es un temporal de regim constant. Es a dir, que per tota la durada de la simulació, estem generant el mateix tipus de temporal, amb un valor d'alçada d'ona, període i direcció al límit, constant en tota la simulació. I per això, el resultat que acabarem obtenint es un espectre de valor constant si deixem transcorre el temps suficient. Passat el temps en que l'espectre ha evolucionat fins a mantenir-se constant, és el temps que desitgem saber per la nostre simulació, ja que per major temps, només augmentaríem el nombre de càlculs a

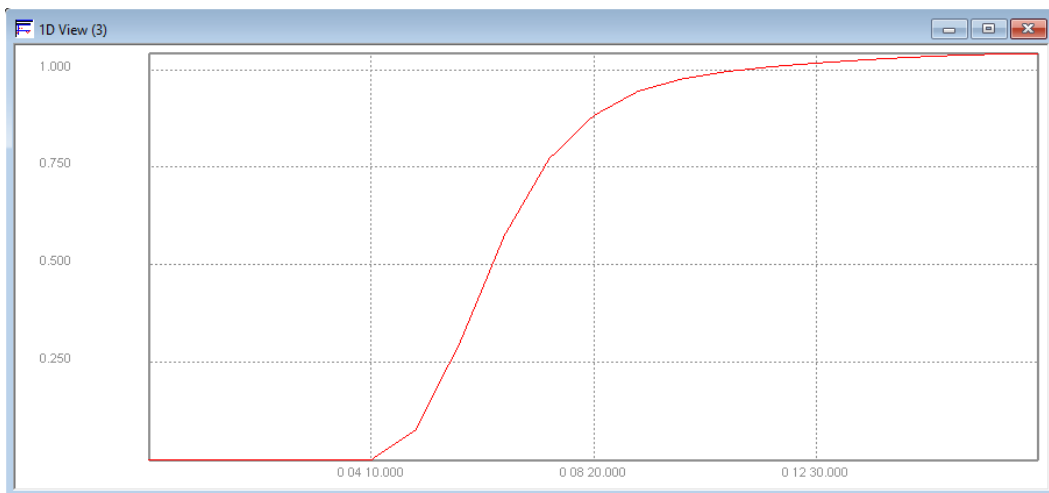


realitzar, i per tant, el temps que trigaria la simulació en computar-se augmentaria sense que variïn els valors resultants.

Per trobar aquest valor, executarem una simulació amb un temps suficientment elevat. A continuació, observarem la progressió del valor d'alçada d'ona d'un node de la zona de treball a tenir en compte, per tant la zona del port. Analitzant aquesta gràfica podem observar si en aquest punt s'ha arribat a un valor constant, i es manté al llarg del temps. El punt on aquesta gràfica es quedi en un valor d'alçada d'ona de manera constant, podrem decidir que aquell és el temps amb el que definirem la nostre simulació.

A continuació es presenta unes gràfiques d'exemple del procediment seguit. Les simulacions que s'han executat tenen totes les mateixes característiques, i no s'ha modificat cap dels arxius de geometria o de condicions de contorn. Tant sols s'ha procedit a variar el nombre d'interval. Pels tres exemples s'ha procedit a un interval de 5 segons.

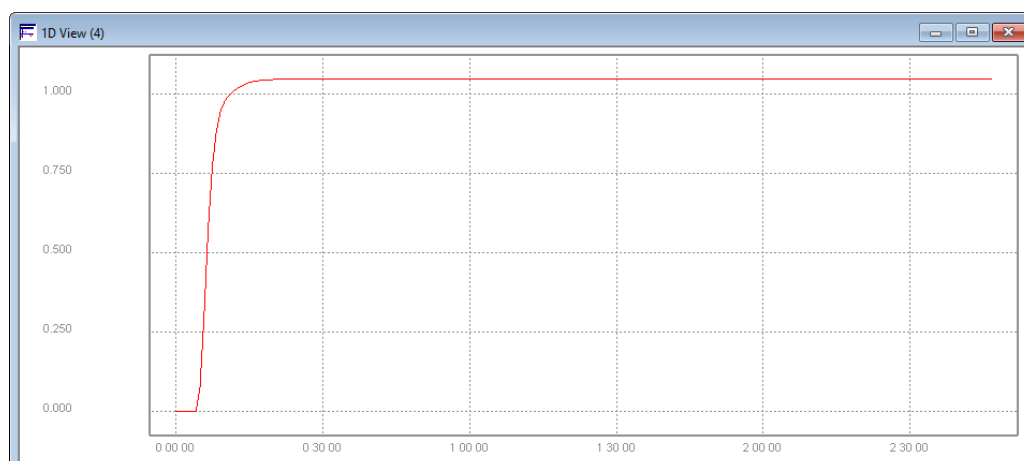
Exemple 1. Nombre d'interval igual a 200.



Font: BLUE KENUE

En aquest primer exemple es veu que la gràfica encara no ha arribat a un valor constant, i per tant el temps de simulació no és suficient.

Exemple 2. Nombre d'interval igual a 2000.

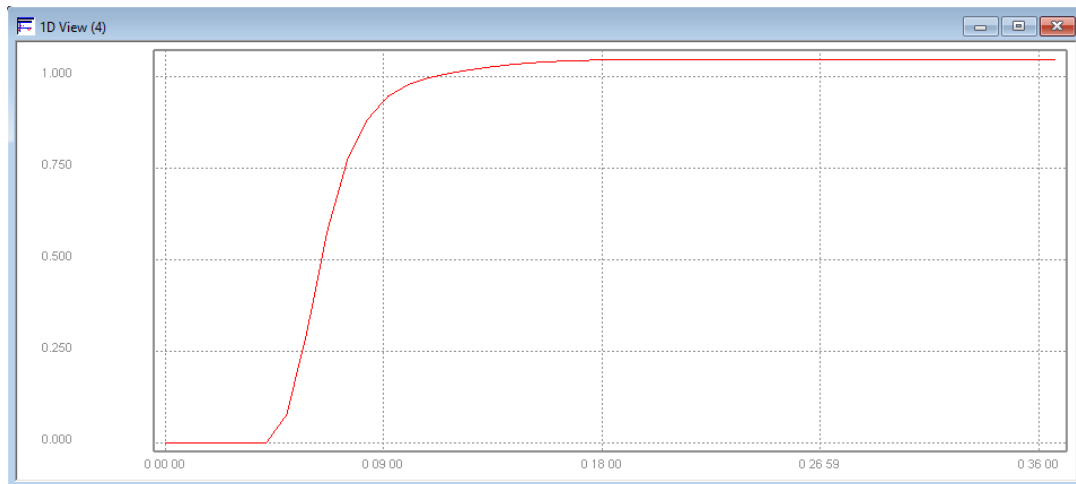


Font: BLUE KENUE

Aquest segon exemple s'observa que el temps és excessiu, s'arriba a un regim constant molt aviat en el temps, i hi ha molt interval de simulació on la variació d'alçada d'ona és nul·la.

Exemple 3. Nombre d'intervalos igual a 600.

En aquest tercer exemple, com es pot veure a la gràfica mostrada a continuació, s'arriba a un valor d'alçada d'ona constant. I es comprova que es constant perquè i ha un cert interval de temps on es pot veure el regim constant. Per tant, podem determinar que aquest valor és l'adequat per a executar la simulació.



Font: BLUE KENUE

D'aquesta manera es pot determinar el temps de simulació més adequat per a un projecte determinat. Com es pot comprovar, aquest temps de simulació no es complirà necessàriament per a qualsevol altre projecte. Segons la mida del domini o el valor del període que determinem a la onada incident, el temps de simulació augmentarà o disminuirà.

Com s'ha dit anteriorment, per acabar de completar el arxiu de condicions per a executar la simulació, ens quedarà especificar uns valors característics del de procediment de software.

El arxiu que estem creant i manipulant amb totes aquestes variables, és en definitiva un arxiu de text modificable, però amb unes característiques concretes alhora de redactar. I cal especificar en aquest document, quins són els arxius a tenir en compte i perquè són, i de quina manera es presentaran els resultats i quin són els resultats que desitgem obtenir.

Per especificar quin arxiu correspon a la batimetria, i per tant a la descripció geomètrica de l'espai, utilitzarem l'ordre *GEOMETRY FILE*. Per altre banda, per especificar l'arxiu de condicions del límit del mallat, s'utilitzarà la indicació *BOUNDARY CONDITIONS FILE*.

Pel que fa als resultats, especificarem quins són els resultats que desitgem obtenir al apartat *VARIABLES FOR 2D GRAPHIC PRINTOUTS*. En aquest apartat s'especificaran només amb un conjunt de sigles quins són els resultats que desitgem obtenir. Pel present projecte només es demanaran els següents resultats.

- XIV. HMO (*Spectral Significant Wave Height*): aquest resultat mostra l'alçada d'ona significativa resultant d'estudiar l'espectre.
- XV. DMOY (*Mean Wave Direction*): aquest resultat mostra les direccions principals que mostra l'evolució de l'espectre.
- XVI. TMOY (*Mean Period*): aquest resultat mostra el període que pren l'espectre en cada punt.

Per últim, cal determinar els intervals en que es mostraran els resultats a l'hora de visualitzar-los amb el post-processor BLUE KENUE. Per l'objectiu d'aquest projecte aquest apartat no es massa rellevant, ja que, es busca el estat final de l'espectre en assolir el regim constant, i per tant, el mes interessant son els valors assolits en el temps final. Tot i així, es necessari especificar un valor per aquesta variable pel correcte funcionament del programa. Per altre banda, sempre es interessant veure l'evolució de la onada en el espai i el temps, observar si es pot millorar el mallat i el domini, observar quines són les primeres zones de la costa on es veuen afectades per la propagació de l'ona, i per tant, estaran més temps sota condicions de temporal.

Per especificar aquesta ordre utilitzarem la indicació *PERIOD FOR GRAPHIC PRINTOUTS*. Amb aquesta indicació diem cada quants intervals de temps s'han de presentar els resultats. Pel present projecte, donat que ens interessa el resultat final, i en part veure l'evolució de la simulació determinarem per aquesta variable **un període de 5 intervals**.

Paral·lelament aquesta variable, també cal concretar necessàriament, pel bon funcionament de la simulació, una última variable. Similar a la mateixa funció que l'anterior variable, però aquesta orientada al interval de llistat dels resultats durant la computació de la simulació. Aquesta variable respon a la següent indicació, *PERIOD FOR LISTING PRINTOUTS*. En aquest projecte, donat que donem un temporal d'alçada d'ona constant en espai i temps, la seva simulació en el temps no pot patir variacions pel que es pugui aturar a la meitat de la simulació. En el cas de afegir-hi variacions en les seves variables al llarg del temps, aquesta variable agafa rellevància per a poder fer el seguiment del bon funcionament de la computació. És per això, que en aquest projecte s'especifica **un període de llistat de 50 intervals**.

Amb tot el que s'ha especificat, ja tenim la simulació preparada per a ser executada definitivament, i obtenir els resultats que seran utilitzats en el càlcul d'ultrapassament. Aquest arxiu que s'ha anat descrivint tindrà la següent forma.

```

1 /-----
2 / TOMAWAC Version v6p2 07-feb-2017
3 / THEPROJECT
4 /-----
5
6 /-----
7 / BOUNDARY CONDITIONS
8 /-----
9 BOUNDARY PEAK FREQUENCY           =0.085
10
11 BOUNDARY SIGNIFICANT WAVE HEIGHT   =1
12
13 TYPE OF BOUNDARY DIRECTIONAL SPECTRUM =6
14
15 BOUNDARY MAIN DIRECTION 1          =285
16
17 BOUNDARY ANGULAR DISTRIBUTION FUNCTION =3
18 /-----
19 / DATA FILE
20 /-----
21 STEERING FILE                     ='theproject'
22
23 GEOMETRY FILE                     ='..\BK_files\geometry_grosa.slf'
24
25 BOUNDARY CONDITIONS FILE ='..\BK_files\contorn_gros.cli'
26 /-----
27 / GENERAL
28 /-----
29 TITLE ='PROJECTONE'
30 /-----
31 / INITIAL CONDITION
32 /-----
33 INITIAL SIGNIFICANT WAVE HEIGHT =0
34
35 INITIAL STILL WATER LEVEL         =0
36 /-----
37 / RESULTS
38 /-----
39 PERIOD FOR LISTING PRINTOUTS       =50
40
41 VARIABLES FOR 2D GRAPHIC PRINTOUTS =HM0,DMOY,SPD,TMOY,POW
42
43 2D RESULTS FILE                    ='Results\onetime.slf'
44
45 PERIOD FOR GRAPHIC PRINTOUTS       =5
46 /-----
47 / SPECTRUM
48 /-----
49 FREQUENTIAL RATIO                 =1.05
50
51 NUMBER OF DIRECTIONS              =24
52
53 MINIMAL FREQUENCY                 =0.05
54
55 NUMBER OF FREQUENCIES              =25
56 /-----
57 / TIME
58 /-----
59 TIME STEP                         =10
60
61 NUMBER OF TIME STEP               =220

```

Font: NotePad

Aquest és el document en format de text, presentat mitjançant NotePad, i que representa la simulació a executar, amb totes les variables comentades anteriorment.

A continuació només queda executar correctament la simulació i analitzar els resultats, que es presenta en el pròxim apartat.

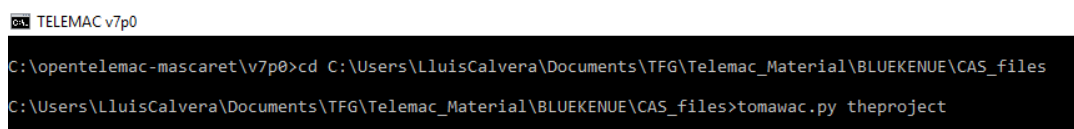
### 2.3.2.6 RESULTATS

Tot el treball realitzat fins ara ens ha servit per a preparar la simulació amb les característiques determinades que hem desitjat. A continuació es pot procedir a computar la simulació i obtenir els resultats. Per aquest procés s'utilitzen dos programes diferents.

En primer lloc, computarem la simulació amb el software de modelatge numèric TOMAWAC, que tal com s'ha especificat, és un programa específic pel càlcul de la propagació d'onades. Anteriorment s'ha comentat que el software TOMAWAC, forma part del grup de programes TELEMAT-MASCARET. L'execució d'aquest grup de programes és de tipologia MS-DOS, es adir a través d'una consola de comandament. En iniciar el programa, estarem obrint tot el paquet de TELEMAT.

Per a fer córrer el programa els passos són molt senzills. En obrir el programa, dins la consola haurem de anar al directori on estigui el arxiu de condicions, que tot just s'ha presentat, que defineix la simulació. Per a anar fins aquest directori, utilitzarem l'ordre "cd", fent referència a les sigles de *change directory*, i que en escriure aquestes sigles seguit de l'adreça de la carpeta on esta situat l'arxiu, ens permet anar al directori desitjat.

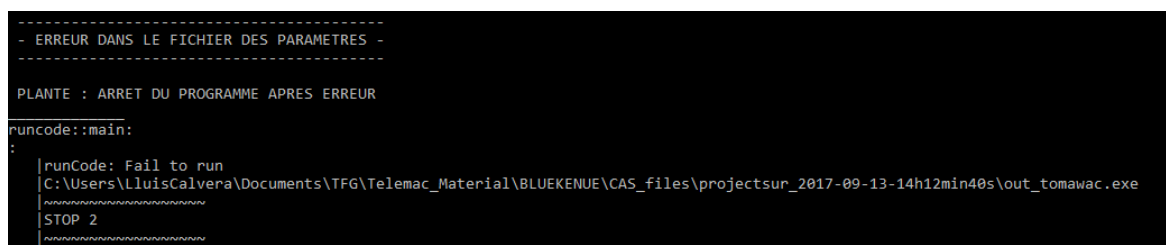
A continuació, iniciarem la computació. Cal especificar que volem fer computar la simulació amb el software de TOMAWAC. Per això, iniciarem la computació amb la ordre "tomawac.py" seguit del nom de l'arxiu que conte la simulació. Amb aquesta ordre, es cridarà a computar al programa TOMAWAC, amb les característiques determinades de la simulació que s'està treballant.



```
TELEMAT v7p0
C:\opentemac-mascaret\v7p0>cd C:\Users\LluísCalvera\Documents\TFG\Telemac_Material\BLUEKENUE\CAS_files
C:\Users\LluísCalvera\Documents\TFG\Telemac_Material\BLUEKENUE\CAS_files>tomawac.py theproject
```

Fig 38. Computació inicial amb la consola de TELEMAT versió 7.0.

Amb aquests passos inicials comença la execució de la computació de la simulació mitjançant TOMAWAC. A la consola es poden anar seguint els passos que el programa està efectuant per a dur a terme la simulació. En primer lloc i de manera molt ràpida, llegeix totes les línies de l'arxiu de condicions de la simulació. Sobretot, fa lectura del arxiu de geometria, que conté la batimetria de l'espai de treball, i per altre banda, l'arxiu de condicions de contorn. Durant aquest procés es pot donar algun error de lectura o de falta de informació al arxiu de la simulació, i el programa aturarà la computació per notificar l'error.



```
- ERREUR DANS LE FICHIER DES PARAMETRES -

PLANTE : ARRET DU PROGRAMME APRES ERREUR

runCode:main:
runCode: Fail to run
C:\Users\LluísCalvera\Documents\TFG\Telemac_Material\BLUEKENUE\CAS_files\projectsur_2017-09-13-14h12min40s\out_tomawac.exe
STOP 2
```

Fig 39. Error durant el procés de computació per error al document de condicions generals.

Si es dona aquest cas, s'ha de llegir amb cura on està l'error. La pròpia consola sol advertir d'on s'ha trobat un error. Així doncs cal rectificar l'error allà on s'hagi especificat.

Els errors més comuns que es poden donar solen ser per culpa del mallat per una banda, i en l'edició del document de text amb les condicions generals, per altre banda. El mallat pot presentar problemes en algunes zones vora el domini, on aquest presenti un contorn molt característic. El més normal és, revisar el contorn i intentar veure quina zona del mallat podria presentar problemes. Es poden trobar exemples dels errors de mallat més usuals dins del fòrum específic per TOMAWAC a la pàgina web de [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org). Si en cas contrari, el error és del document de condicions generals, cal llegir a quin punt es dona el problema, i de quin problema es tracta. Normalment indica a quina línia del document s'ha trobat el problema. Dins de la guia "*Tomawac Operating Manual*" es poden trobar els claus per editar correctament el document sense portar a error.

Si durant la lectura del document no es troba cap error, es procedirà al càlcul de la propagació. Aquesta part és la que porta més estona de executar donat la gran quantitat de dades que s'han de processar, i la gran quantitat de càlculs que s'han d'executar. Pel present projecte, si la lectura de dades ha sigut correcte, aquest procés no pot portar a cap error. Donat que es simula un onatge completament regular i constant a l'espai i al temps, el procés de càlcul no pot portar a cap error.

En acabar el procés de simulació, la mateixa consola ens notificarà que ha acabat, quanta estona ha trigat i a quin arxiu es poden visualitzar els resultats.

```
CORRECT END OF RUN

ELAPSE TIME :
              8 MINUTES
             16 SECONDS

.....

... handling result files
  +> projectsur
      moving: resultats.slf

My work is done
```

*Fig 40. Missatge final un cop el programa a realitzat correctament la simulació.*

Els temps d'execució de les simulacions per aquest projecte han oscil·lat entre els 5 i 10 minuts. Les causes principals per aquesta diferència de temps és la malla del arxiu geomètric en cada direcció. Cada malla té un número diferent de nodes, on a cada un d'ells s'efectuarà un càlcul.

Els resultats que finalment presenta el programa TOMAWAC, com es pot veure en la figura anterior, son del tipus SELAFIN. Aquest tipus de arxiu correspon al mateix que s'ha utilitzat per a crear les malles dels arxius de geometria per representar la batimetria. Per a poder llegir els resultats i analitzar-los gràficament, utilitzarem el mateix programa anteriorment per crear la malla de batimetria, el BLUE KENUE, però aquest cop com post-processor.

A continuació es presenten els resultats que s'han obtingut d'executar les diferents simulacions. Només es mostraran els resultats per al càlcul d'alçada d'ona significativa. Els resultats que es presenten són les mateixes malles mostrades anteriorment, segons la direcció corresponent, però un cop ens trobem en règim constant, es a dir, al final de la simulació. Es presentaran dues imatges, una amb la situació del domini sencer de cada direcció, i una segona imatge amb el detall de la zona d'influència del port.

DIR 270<sup>0</sup> (EST)

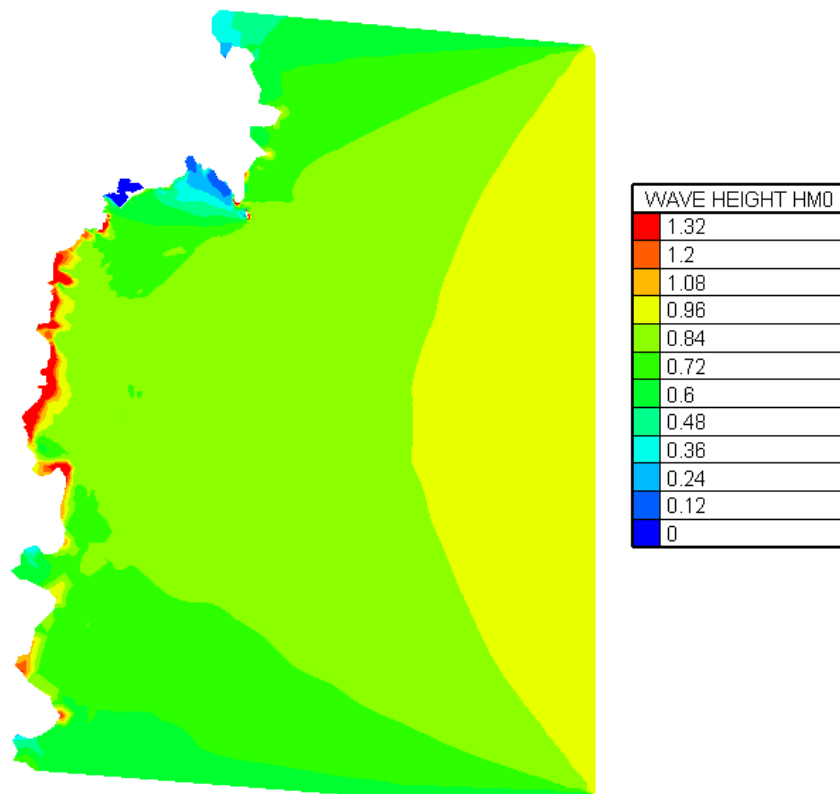


Fig 41. Visió general dels resultats d'alçada d'ona, en la direcció est. (Font: BLUE KENUE).

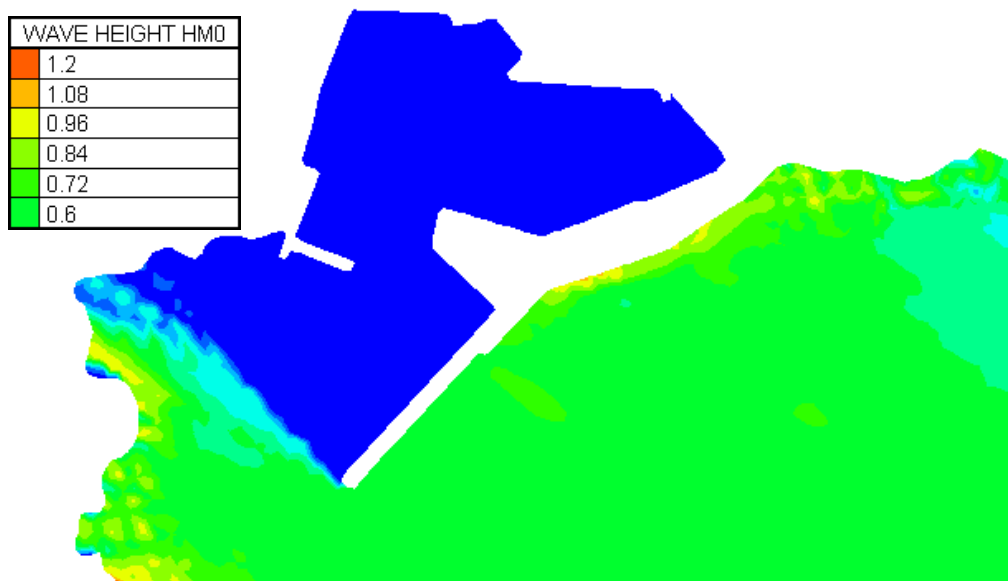


Fig 42. Detall zona de port per onatge de direcció est. (Font: BLUE KENUE).



Es pot veure en la visió general del domini, que per a temporals des dels  $270^\circ$ , l'alçada d'ona que arribar a incidir al port de cala ratjada es veu força disminuïda per dos factors determinats.

En primer lloc, la diferència entre l'angle de la direcció de l'ona al límit del domini i l'ona que acaba incidint al dic exterior del port, comporta una disminució de l'alçada d'ona per efecte de la refracció, comentat anteriorment. En aquesta visió gràfica de l'evolució de l'alçada d'ona en el domini segons una direcció de propagació, es veu clarament que el port queda fora de la zona de incidència directe.

Per altre banda, es nota una gran reducció per difracció causat per la punta de Cala Gat, així com el Faralló de Cala Gat. Donada la posició a la que es troba el port de Cala Ratjada respecte al Faralló de Cala Gat, aquest queda parcialment al abric de les onades que venen de l'est, com és aquest cas. Com que el port es troba a força distància del Faralló, la disminució d'alçada d'ona es menor en comparació de si es trobés més a prop. Però, es pot veure com l'efecte de difracció ajuda a disminuir l'alçada d'ona incident al port per aquest tipus d'onatge.

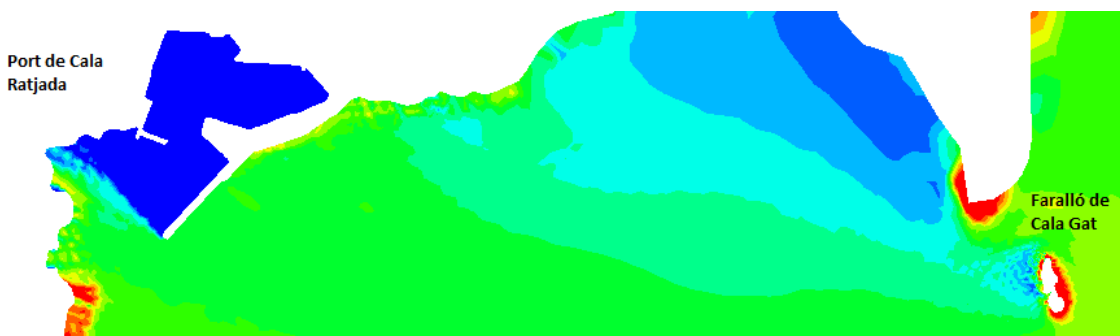
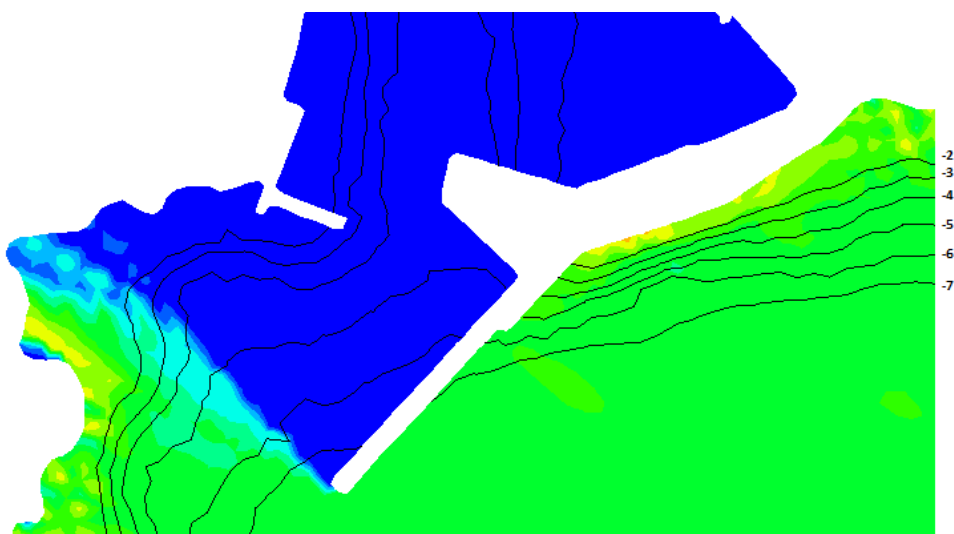


Fig 43. Detall gràfic de l'efecte de la difracció. (Font: BLUE KENUE).

Finalment, com es pot veure en el detall de la visió del port, que l'alçada d'ona incident per tot el dic extern és gairebé constant. Per la alineació més propera a la costa es troben algunes alçades d'ona més elevades, just tocant al dic. Cal entendre que per aquesta alineació, el tipus de dic és en talús, i per tant per profunditats menors es poden donar alçades d'ona molt elevades però irreals, ja que la onada ja haurà trencat.



Per tant, observant les escales de colors, s'observa que en propagar una onada des de la direcció est amb alçada d'ona d'un metre, al dic exterior del port **incideix una alçada d'ona d'entre 0.6-0.72 metres principalment.**

Es pot declarar que no és la direcció on més es conservi l'alçada d'ona, i per tant, sigui una direcció que pugui provocar temporals perillosos.

DIR 292.5° (EST-SUR-EST)

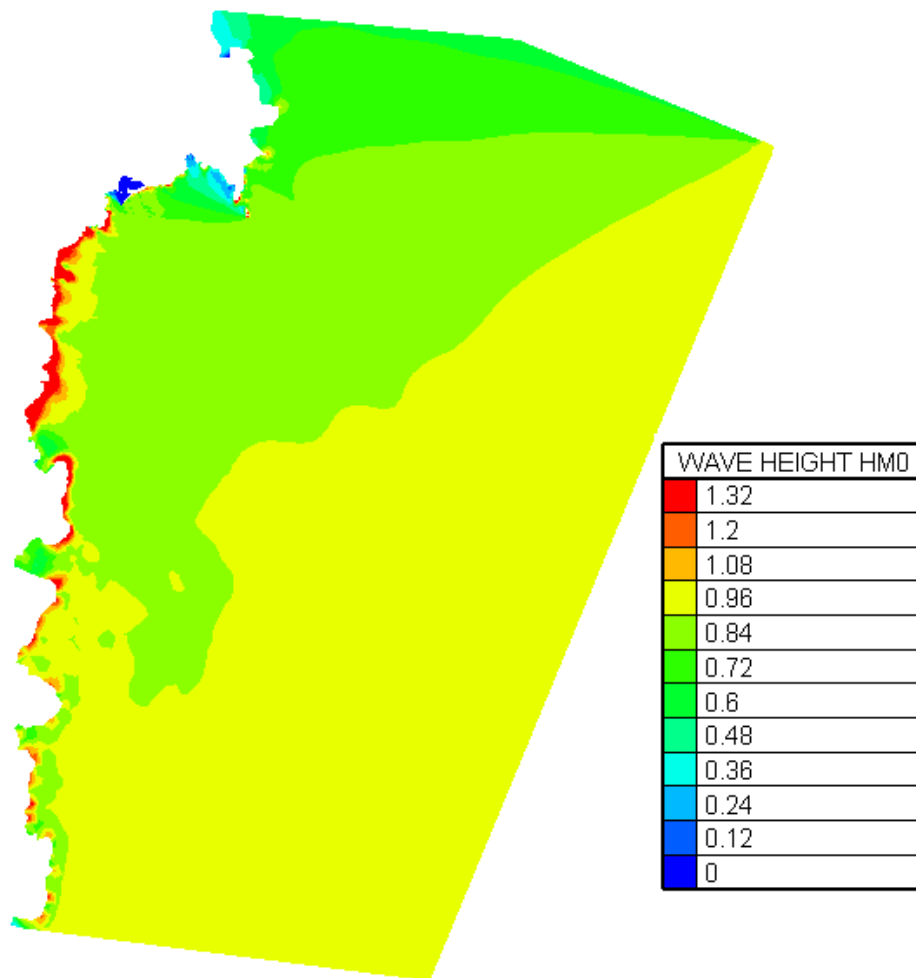


Fig 44. Visió general dels resultats d'alçada d'ona, en la direcció est-sur-est. (Font: BLUE KENUE).

De la visió general s'observa una incidència al port força clara per la direcció de propagació est-sur-est. Tot i així, es pot observar que la punta de Cala Gat ofereix una certa de protecció en generar una difracció de les onades. De igual manera, tota la badia de Cala Ratjada, formada principalment per la Cala Gat, ajuden a dissipar la energia de les onades en variar la seva direcció per refracció. Però en general amb onatges des d'una orientació de 292,5°, es demostra que la incidència de les onades per tota la badia és més directe.

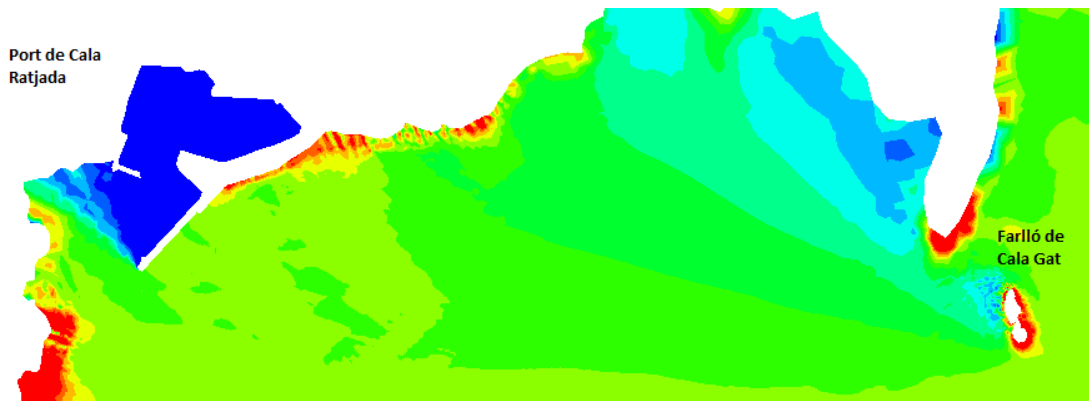


Fig 45. Detall del procés de difracció pel Faralló de Cala Gat. Direcció  $292.5^{\circ}$ . (Font: BLUE KENUE).

Com es pot veure a la figura presentada anteriorment amb el detall del procés de difracció per aquest tipus d'onatge, des de la platja de Cala Gat fins al inici del dic, l'alçada d'ona del espectre calculat passa dels 0.36 metres d'alçada a la platja a 0.84 metres a l'inici de dic. Es pot determinar que hi ha un cert factor de reducció per difracció, però l'alçada d'ona que incideix a la zona del port és d'un valor important.

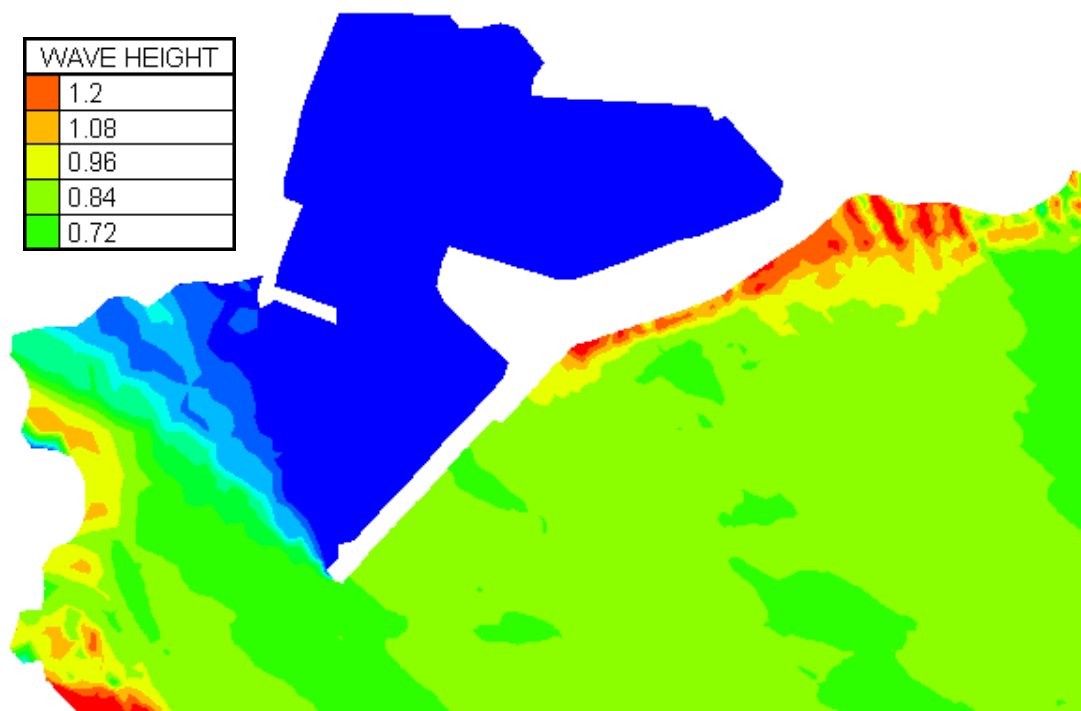


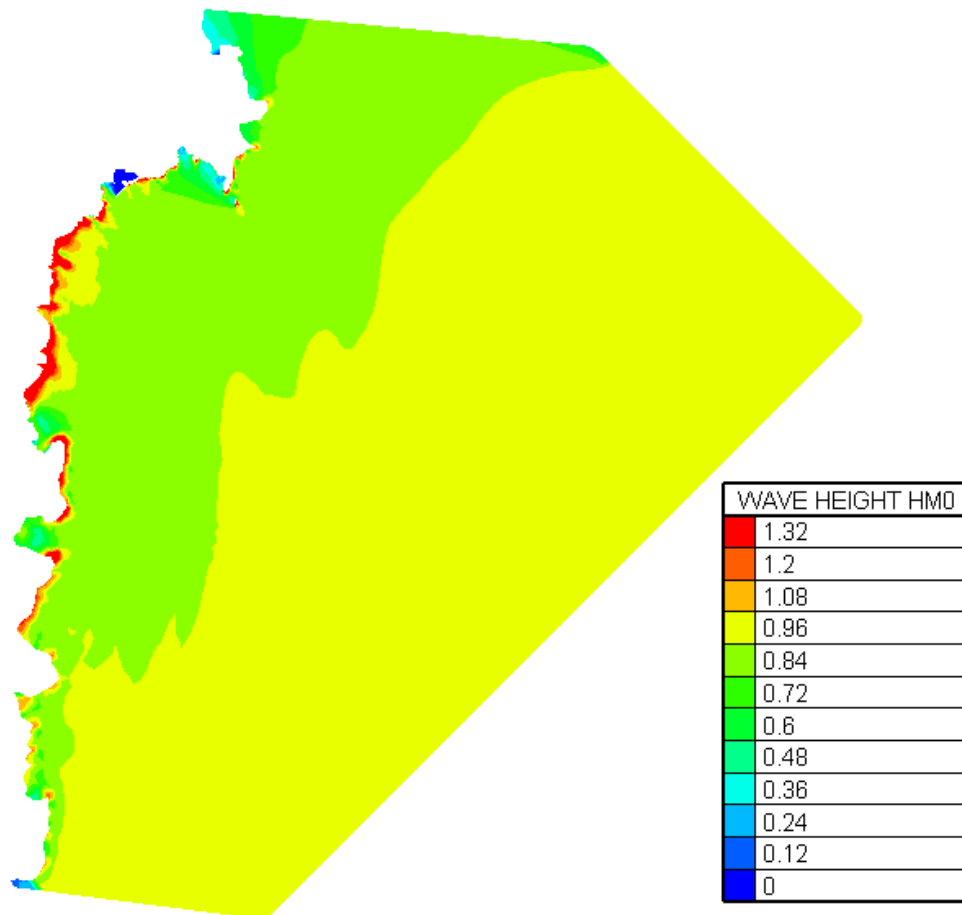
Fig 46. Detall de l'alçada d'ona al port de Cala Ratjada. Direcció  $292.5^{\circ}$ . (Font: BLUE KENUE).

Observant el detall de la zona del port de Cala Ratjada, es veu un claríssim augment de l'alçada d'ona en tot el conjunt del dic exterior, en comparació als resultats per la direcció  $270^{\circ}$ . Igual que als anteriors resultats, es pot veure una alçada major per la zona del dic mes propera la costa, donat el seu perfil en talús. També, es comprova un augment ja per la alineació del mig, on la profunditat del peu d'estructura es troba a una menor profunditat, el que comporta un augment de l'alçada d'ona. Per la alineació del morrot, on la profunditat és més elevada, el valor d'alçada es manté menor que a la resta de alineació.

Resumint, per aquest tipus d'onatge, propagant un 1 metre d'alçada d'ona provinent dels 292,50, les alçades d'ona resultants al dic extern són les següents.

- XVII. ALINEACIÓ MORROT, alçada d'ona pels voltants del 0.8 metres.
- XVIII. RESTA DE DIC, aproximadament, els valors a tenir en compte al peu de la estructura queden al voltant de 0.95 metres.

**DIR 315° (SUR-EST)**



*Fig 47. Visió general dels resultats d'alçada d'ona, en la direcció sur-est. (Font: BLUE KENUE).*

En aquesta visió general dels resultats d'alçada d'ona per una onada propagada des del sur-est, s'observa que la incidència de la onada és gairebé directe al port. Per l'orientació en la que es troba el port, aquest tipus d'onatge és el que incideix de manera més directe, i per tant, sigui la direcció amb el que l'onatge arribi amb més quantitat d'energia al port. La disminució d'alçada d'ona per efecte de la refracció, serà molt menor que en la resta de casos.

Per altre banda, es pot observar que per aquest tipus d'onatge, el port no queda protegit sota l'abric de la punta de Cala Gat. Es pot veure pel procés de difracció sota el Faralló de Cala Gat, com la zona de la platja mateix, que no arriba fins a la zona d'influència del port. És més, zona de costa al nord del port es donen uns resultats d'alçada d'ona molt elevats,

i posteriorment es comença a percebre l'efecte de la difracció. A la següent figura es pot veure en detall el procés de difracció en la zona, així com els aspectes comentats.

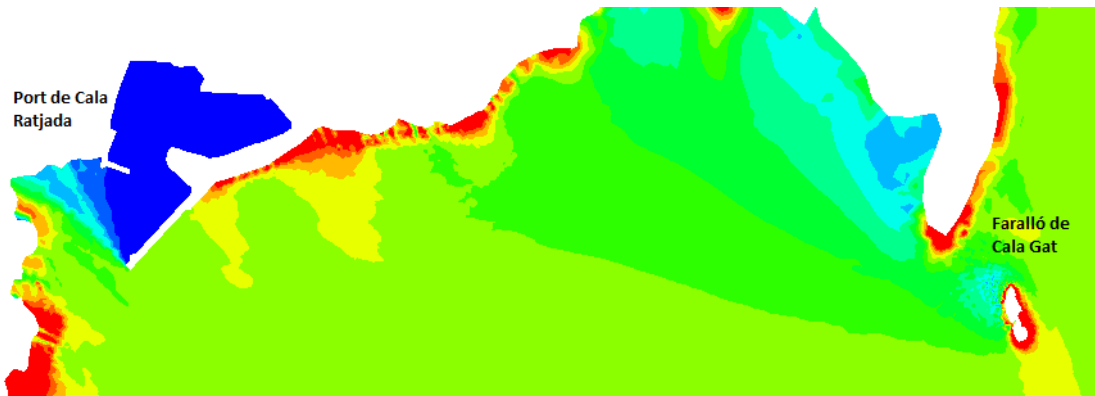


Fig 48. Detall del procés de difracció, en la direcció sur-est. (Font: BLUE KENUE).

Tenint en compte aquest aspecte i el poc coeficient esperat per refracció esmentat en observar el domini general, són clars indicadors de que per aquest onatge es donaran valors d'alçada més elevats, per la simulació generada.

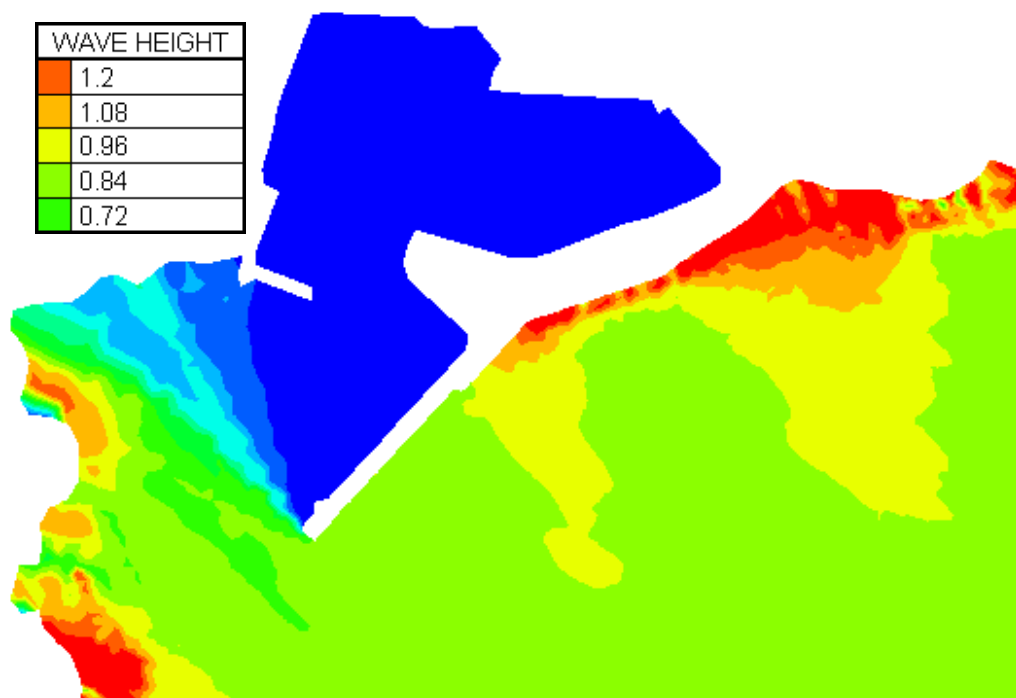
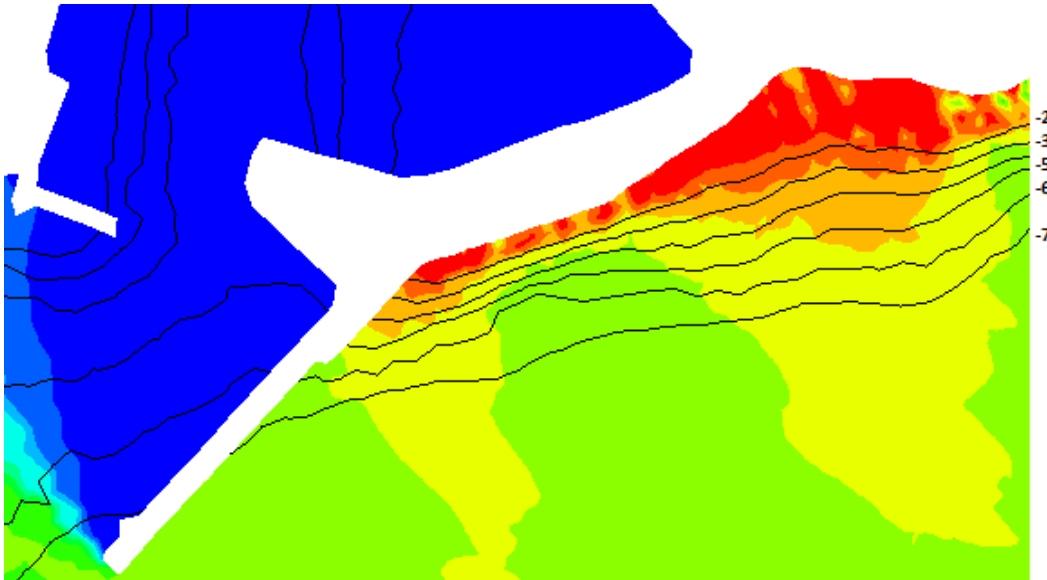


Fig 49. Detall de l'alçada d'ona en la zona del port, en la direcció sur-est. (Font: BLUE KENUE).

Observant doncs el detall dels resultats en la zona d'influència del port es comprova el que estava previst. En primer lloc es pot observar dos zones que concentren valors d'alçada d'ona molt elevats.

Ens fixem primer en l'alineació més propera a la costa. S'observa un claríssim augment de la alçada d'ona en tot el seu conjunt. Es pot observar que en una zona específica, la concentració d'una alçada d'ona elevada és molt major. Es dona aquest fet degut a la batimetria característica en aquesta zona. El pendent en aquesta zona és més pla que a la resta de la alineació el que genera que les onades creixin abans. També comporta que les

onades puguin trencar abans, i vagin dissipant l'energia al llarg de la zona de trencament. Donat que per aquesta simulació no es té en compte el procés de trencament, l'onada no para de créixer en arribar a la costa, i això genera aquestes zones extenses d'alçada d'ona elevada. Per la resta d'alineació, es dona un augment general de l'alçada d'ona, en comparació a les direccions ja observades anteriorment.



*Fig 50. Detall de la batimetria a la zona del port, en la direcció sur-est. (Font: BLUE KENUE).*

Pel que fa als valors d'alçada d'ona que podem trobar al llarg d'aquesta alineació al propagar una onada d'un metre d'alçada, oscil·len entre valors d'alçada d'ona de 0.9 metres i 1.1 metres. Onades que després de propagar, conserven o augmenten la seva capacitat energètica a l'hora de trencar.

#### DIR 337.5° (SUD-SUD-EST)

Observem a continuació els resultats en el domini general per a la direcció SUR-SUR-EST. Donada la diferència entre la direcció d'ona en aigües profundes i la direcció perpendicular del dic del port, pot suposar que els coeficients de refracció i shoaling puguin fer disminuir els valors d'alçada d'ona. En comparació amb la direcció anterior, EST, els valors d'alçada d'ona disminueixen en el domini general de la direcció SUR-SUR-EST. Per altre banda, des de la visió general, tot i observar-se una disminució general de l'alçada d'ona, per les zones d'incidència més directe, corresponents a la zona de costa entre el port i la platja de Cala Gat, i per altre banda, la part del dic més proper a la costa, són zones que demostren uns valors d'alçada d'ona just a la costa molt elevats.

Això implica que per aquesta direcció, la zona al sud del port de Cala Ratjada, actua de dissipador de l'energia, i per tant, disminuint l'alçada d'ona per la zona propera al morrot del dic.

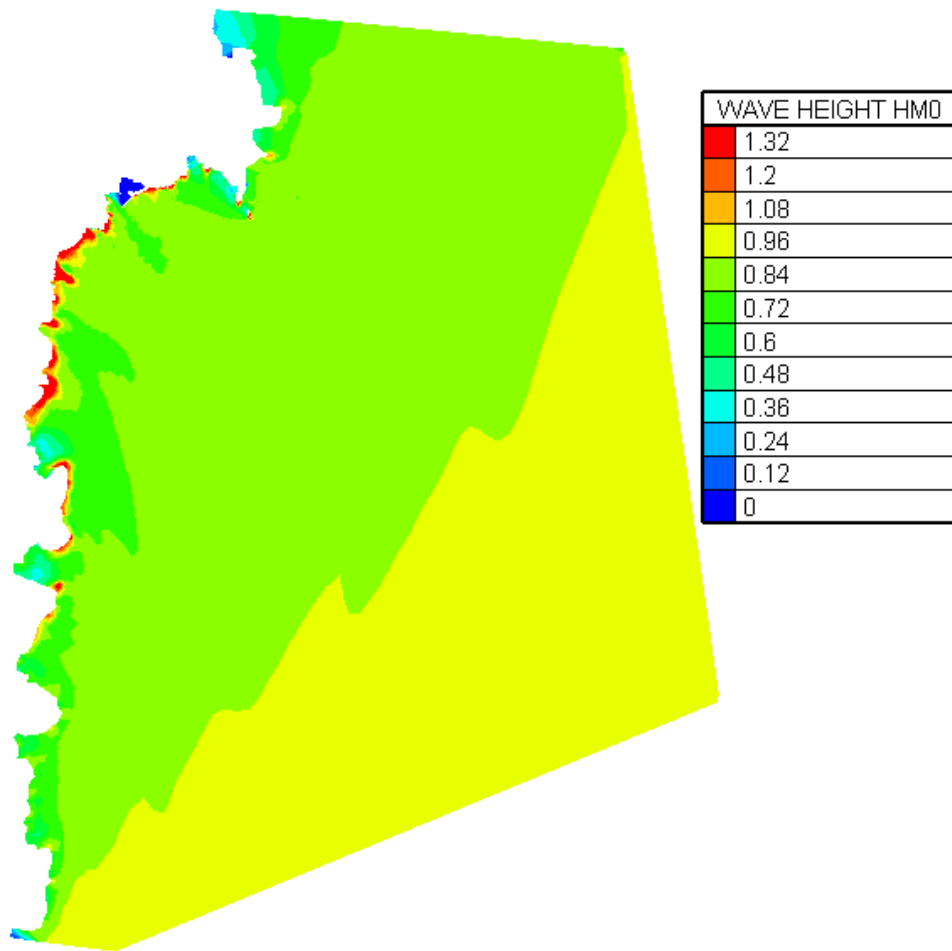


Fig 51. Visió general dels resultats d'alçada d'ona, en la direcció sur-sur-est. (Font: BLUE KENUE).

S'observa també que per aquesta direcció de propagació, la incidència de la onada al port és diferent segons la zona del dic que es contempli. Per una banda, per l'alineació

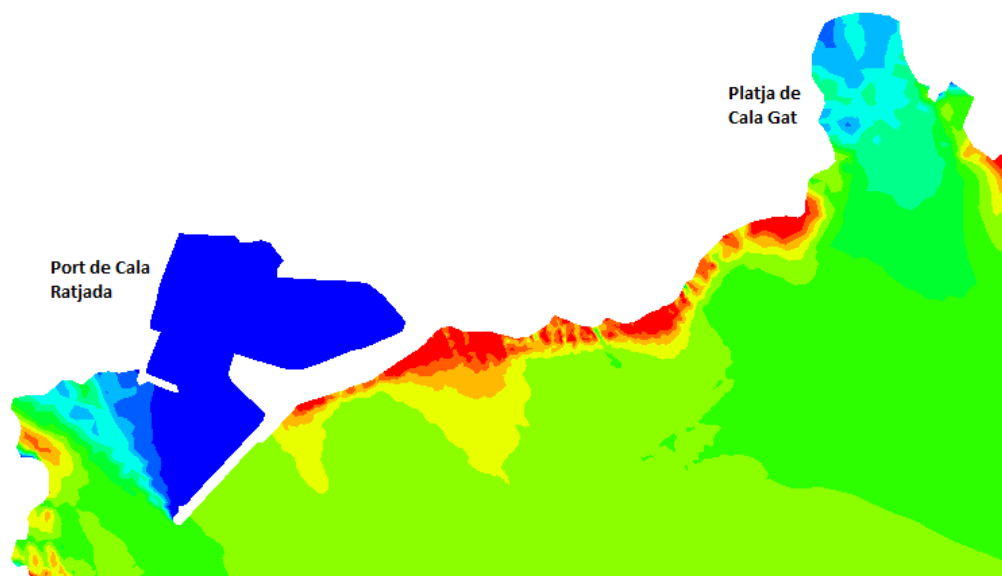


Fig 52. Detall de la zona entre el port i la platja de Cala Gat. (Font: BLUE KENUE).

Tal com s'ha comentat, a la figura anterior es pot veure aquest augment puntual de l'alçada d'ona en aquesta zona. Cal especificar que per tota la zona amb alçades d'ona



més elevades, corresponen a zones amb un comportament de dic en talús, i que per tant, l'alçada d'ona final dependrà de la condició de trencament d'onada.

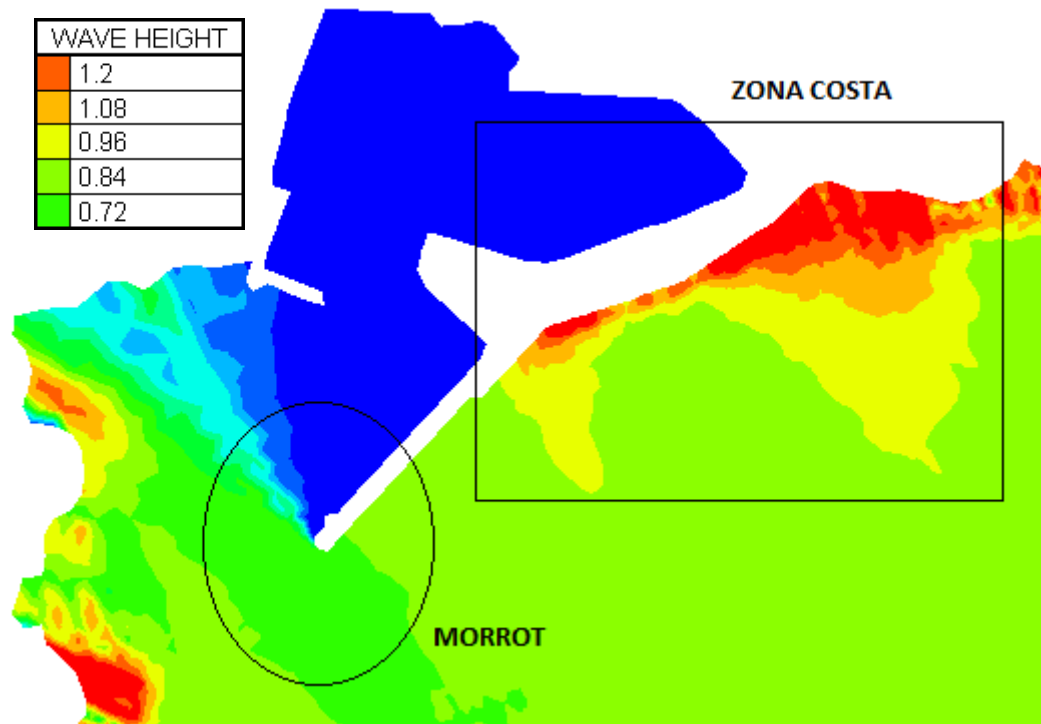


Fig 53. Detall de la zona del port de Cala Ratjada. (Font: BLUE KENUE).

En la figura anterior podem veure en detall el comportament dels valors d'alçada d'ona per tota la zona del port. Abans d'entrar en els valors d'alçada d'ona, cal destacar els dos aspectes destacats anteriorment, que es donaven per aquesta direcció de propagació. Per una banda, s'ha comentat la contribució de la zona sud del port en disminuir l'alçada d'ona, i que es veu els seus efectes en la zona del morrot. Aquests resultats es comproven amb aquesta imatge, on a la zona del morrot del dic l'alçada d'ona es menor. En segon lloc, l'augment puntual de l'alçada d'ona per a la zona del dic més propera a la costa

Observant els valors definitius, es determina que justament per aquesta zona més propera a la costa, els valors de alçada d'ona per propagació són els més elevats en comparació amb la resta de direccions estudiades, juntament amb els resultats en la propagació d'ona des de la direcció SUR-EST. Per tant, per la zona propera a la costa obtindrem valors d'entre 0.9-1.1 metres. Recordem que en aquesta zona el dic és de tipus talús, i el valor de trencament d'ona fixarà l'alçada d'ona final. Per altra banda, per la zona mitja del dic exterior els valors d'alçada d'ona es mantenen elevats, entre els 0.9-1 metres. I per últim, l'alçada d'ona per la zona del morrot oscil·la als voltants dels 0.885 metres d'alçada d'ona aproximadament.

DIR 360° (SUR)

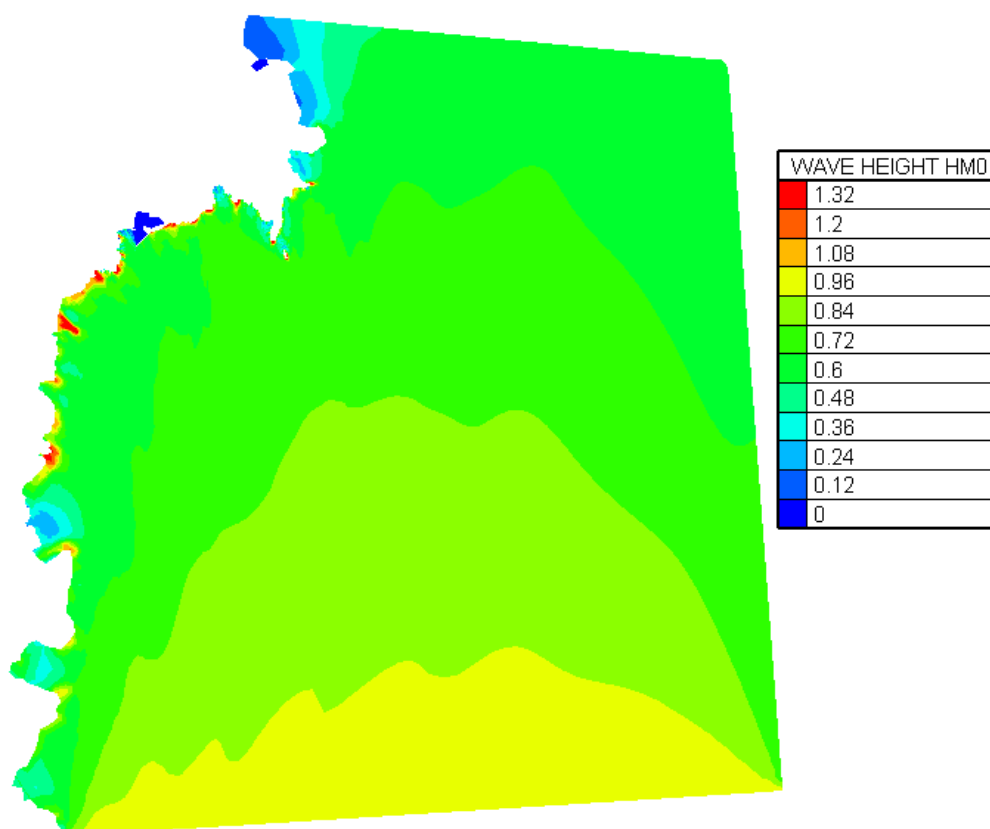


Fig 54. Visió general dels resultats d'alçada d'ona, en la direcció sud. (Font: BLUE KENUE).

Aquest és el comportament del valor d'alçada d'ona en propagar una onada des del sud. Primer de tot, es contempla una clara disminució de l'alçada d'ona per a tot el domini general. Per tots els casos estudiats, la propagació des del sud, dona clarament els valors més baixos pel domini general.

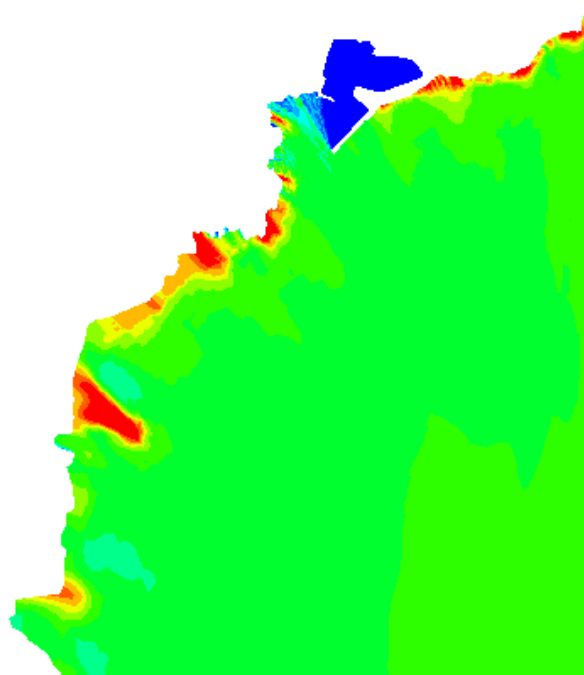
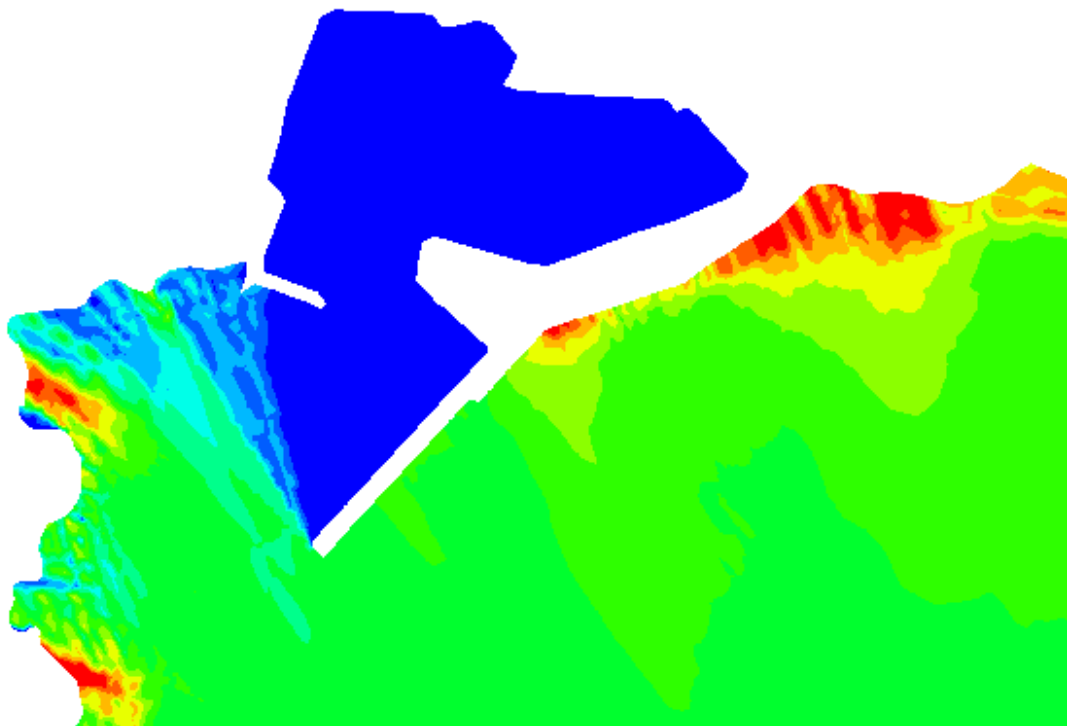


Fig 55. Detall del procés de refracció i la clara disminució d'alçada d'ona. (Font: BLUE KENUE).

Es nota una disminució molt elevada amb la direcció anterior, des dels  $315^\circ$ . Aquesta disminució tant elevada ve conduïda per l'efecte de reducció generat per a la refracció d'ona en tota la zona de costa al sud del port. Donat que el port està alineat amb tota la zona de costa del sud, les onades perden alçada d'ona per efecte de la refracció en tota aquesta zona, i el resultat final és una alçada d'ona incident molt petita. Per tant, tot aquest tram de costa al sud actua com a protecció pel port.

A la imatge anterior, es pot veure que aquesta disminució de l'alçada d'ona per procés de refracció, afecta directament a la zona d'incidència al dic exterior. Per gairebé la meitat del dic aquesta alçada d'ona es veu clarament afectada. En canvi a la zona més propera a la costa per la part nord, es poden veure zones puntuals amb valors d'alçada d'ona més elevats. Aquest augment de l'alçada d'ona és més comprensible donat que l'orientació del dic és més igual a la direcció de propagació de la onada, i per tant té major incidència, i per altra banda, està més allunyat de la zona de refracció esmentada anteriorment.



*Fig 56. Detall de la zona del port de Cala Ratjada. (Font: BLUE KENUE).*

Podem observar en la figura anterior, el detall del comportament de l'alçada d'ona just a la zona d'incidència. En primer lloc, en línia general es compleix que l'alçada d'ona és menor per a tot el dic exterior. Per altra banda, destacar la clara poca alçada d'ona que s'obté per a la zona del morrot. Per aquesta zona els valors d'alçada d'ona a peu d'estructura oscil·len entre els 0.65-0.7 metres. Comencem a observar un augment de l'alçada d'ona per a la zona mig fins a la alineació de la costa, però que també està causat per la condició de tipologia de talús que caracteritza tota aquesta zona. Posant la comparació de l'alçada d'ona amb la batimetria de la zona es pot observar que l'augment de la alçada d'ona està relacionat amb la batimetria.

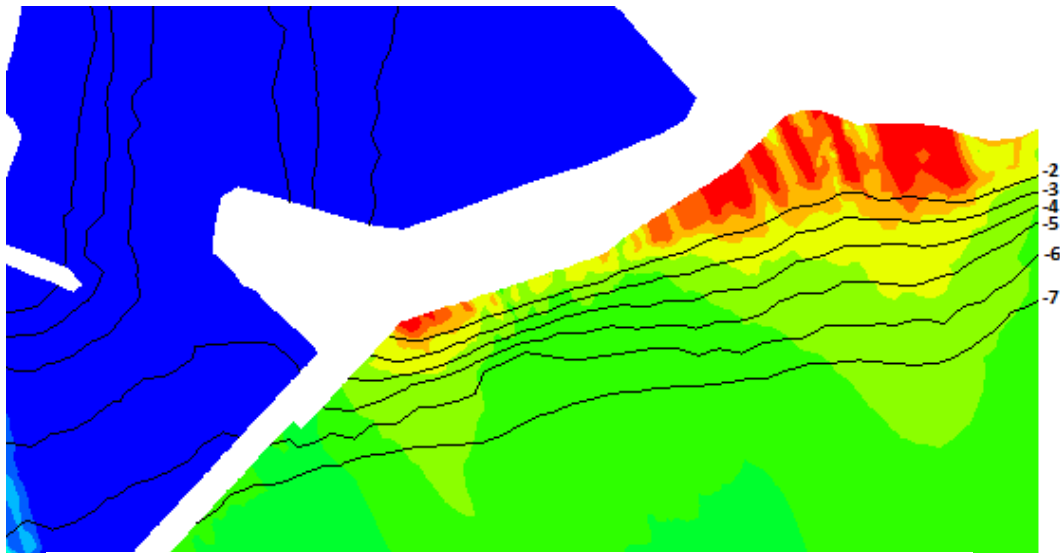


Fig 57. Comparativa d'alçada d'ona amb la batimetria. (Font: BLUE KENUE).

Tal com es pot veure en aquesta figura, l'augment d'alçada d'ona per aquesta zona ve determinat, principalment, per la batimetria característica de la zona. Observant els valors d'alçada d'ona que es donen per aquesta zona, si que trobem un petit augment, determinat pels aspectes anteriorment comentats. Es per això que, en la resta de alineació els valors d'alçada d'ona entre els 0.75 i 0.85 metres. Es pot determinar que de tots els casos estudiats, la propagació des del sud és la menys perillosa de cara al ultrapassament d'onades per sobre el dic.

## 2.4. ULTRAPASSAMENT

L'objecte principal d'aquest estudi es centra justament en la determinació d'aquest punt. Tal com s'ha comentat anteriorment, el que es desitja calcular i estudiar és l'ultrapassament que es pot desenvolupar al port durant un temporal extrem. Tots els procediments seguits i explicats anteriorment, s'han realitzat amb la intenció d'arribar a obtenir aquest valor.

L'ultrapassament existirà normalment en períodes de temporal on grans onades incideixen sobre les estructures de protecció de la costa, i una certa quantitat d'aigua superen la cota superior de l'estructura, fins arribar a la zona que es vol protegir. Existeixen dos tipus d'ultrapassament. Per una banda, conegut amb el nom anglès "*Green water*", és per aquell ultrapassament que supera la estructura de protecció pujant progressivament, arribant a la superfície de la lamina d'aigua sencera fins al punt més alt. És un tipus d'ultrapassament no violent, característic d'ones que no arriben a trencar i que es sol veure en dics relativament baixos. Com es pot veure en el exemple mostrar a continuació, donat que la profunditat del peu d'estructura es molt elevat, l'onada no arriba a trencar abans de incidir amb la estructura, i la alçada relativa d'aquesta es suficientment baixa perquè la superi amb facilitat, sense arribar a trencar.



*Fig 58. Ultrapassament tipus Green Water en un model a petita escala. (Google Imatges).*

D'altra banda, es pot donar l'ultrapassament de tipus Spray. A diferència de l'anterior, l'onada en trencar genera una gran columna d'aigua que seguidament supera la superestructura. Aquest tipus d'ultrapassament es característic de estats de mar on l'onada està en condicions impulsives o trencament just abans de xocar amb la estructura. Es pot donar tant per dics en vertical com en talús.



*Fig 59. Ultrapassament de tipus Spray en dic Vertical, Port de Cala Ratjada. (Font: PortsIB).*



*Fig 60. Ultrapassament de tipus Spray en dic talús, Port de Cala Ratjada. (Font: Video YouTube).*

Per a explicar el procediment de càlcul de l'ultrapassament, s'ha dividit aquest en dos punts, i així poder detallar millor el procés.

#### 2.4.1. DETERMINACIÓ D'ALÇADA D'ONA DE CàLCUL ( $H_D$ ).

La variable principal que determinarà la quantitat d'ultrapassament, serà l'alçada d'ona incident al dic exterior. En aquest apartat es vol determinar quin és el valor d'alçada d'ona amb el que es treballarà per calcular el valor d'ultrapassament resultant. Aquesta alçada d'ona l'anomenarem alçada d'ona de càlcul o de disseny ( $H_D$ ).

El procediment que seguirem per determinar aquesta alçada d'ona serà la de comparar el valor d'alçada d'ona resultant de fer la propagació des d'aigües profundes, amb el valor d'alçada d'ona segons el trencament. Per trencament ens referim a la limitació de alçada que pot tenir una onada segons la seva estabilitat, i ve condicionada per la profunditat del fons marí. En el punt de trencament l'onada deixa de créixer i dissipa la energia per a reduir la seva alçada i mantenir la seva estabilitat.

Repasant els passos seguits i comentats en els apartats anteriors, segons els resultats del apartat E, hem suposat el nostre temporal generat en 5 direccions diferents. Aquesta distinció provoca que es realitzin fins a 5 propagacions diferents, obtenint uns valors de propagació diferents per a cada direcció. Això comporta que segons la direcció estudiada, l'alçada d'ona resultant sigui diferent. Ara bé, l'objectiu d'aquest projecte és el càlcul del cabal d'ultrapassament màxim, i aquest valor, probablement es donarà amb la major alçada d'ona possible. Per tant, caldrà determinar per quina d'aquestes direccions es dona l'alçada d'ona incident major.

Com s'ha vist anteriorment, una onada en propagar-se pateix una variació en la seva alçada. S'havia representat l'evolució que patia l'alçada d'una ona en propagar-se des d'una zona de aigües profundes fins a la costa en una direcció completament perpendicular. S'observa que l'alçada d'ona, representada pel coeficient de shoaling, disminueix fins a un valor mínim ( $K_s = 0.91$ ), per a augmentar indefinidament un cop es troba molt a prop de la

costa. Aquest creixement de alçada d'ona que pateix en ser molt a prop de la costa està condicionat pel trencament de la onada.

L'objectiu per a determinar l'alçada d'ona real que incideix al dic serà la de comparar els valors d'alçada d'ona per propagació i per trencament a la profunditat desitjada, en aquest cas al peu del dic, o pròxim. El valor mínim entre ells serà l'alçada d'ona de càlcul o de disseny ( $H_D$ ).

#### 2.4.1.1 ALÇADA D'ONA RESULTANT PER PROPAGACIÓ.

Com s'ha comentat al inici de l'apartat C, la propagació estudia el comportament que té una onada al viatjar des d'un punt a un altre. Si es coneixen les dades de partida d'aquesta ona, com són el període, la direcció, l'alçada i la profunditat del fons marí, es poden determinar les variacions que pateix la onada per efecte de la propagació en el proper punt, i per tant la seva alçada d'ona. Recordem a continuació la formulació que fem per al càlcul de l'alçada d'ona per propagació.

Al apartat B.1. es determinen els coeficients de direccionalitat a aplicar per a cada direcció estudiada. I per altre banda, al apartat C.1 s'han calculat els valors d'alçada d'ona en aigües profundes a la boia de Capdepera. Per últim queda especificar els valors de coeficient de Shoaling que s'utilitzaran per a realitzar aquest càlcul.

Mitjançant Tomawac s'han calculat els valors de shoaling per a cada direcció per a tot el domini estudiat (apartat C.2), els resultats corresponents es presenten al apartat C.2.6. L'únic pas que queda per fer és determinar quins valors de  $K_s$  es prendran per a cada direcció. Com es pot veure, el valor d'aquest coeficient no és el mateix per a tot el domini, en funció de la direcció de l'onada i la profunditat de cada punt el valor serà diferent. I per això, cal decidir quin valor prendrem dels resultats obtinguts mitjançant Tomawac.

##### 2.4.1.1.1 Determinació dels coeficients de Shoaling.

Per a determinar correctament aquests coeficients estudiarem en detall els resultats obtinguts mitjançant Tomawac. En primer lloc, el domini modelat i estudiat amb Tomawac és molt extens, i cal determinar la zona d'interès. Pel present projecte, ens interessa obtenir les dades de d'alçada d'ona a la zona d'incidència amb el dic del port.





Fig 61. Isolínies dels valors  $K_s$  cada 0.1 per a la zona d'incidència amb el dic del port. (Font: BLUE KENUE).

A la figura anterior es pot observar perfectament com varia el valor del coeficient de shoaling segons on es miri. Pel que fa davant de la alineació de la costa, zona amb talús, es pot veure un clar augment del coeficient, propiciat per la poca profunditat del talús. En aquesta zona, caldrà agafar valors de shoaling a l'alçada de peu de talús.

Pel que fa a la zona de dic vertical, no s'aprecia tant de canvi en els seus valors. Per analitzar més a fons aquest punt anem a estudiar el detall en aquesta zona, observant les isolínies pels valors de shoaling entre 0.7 i 1.

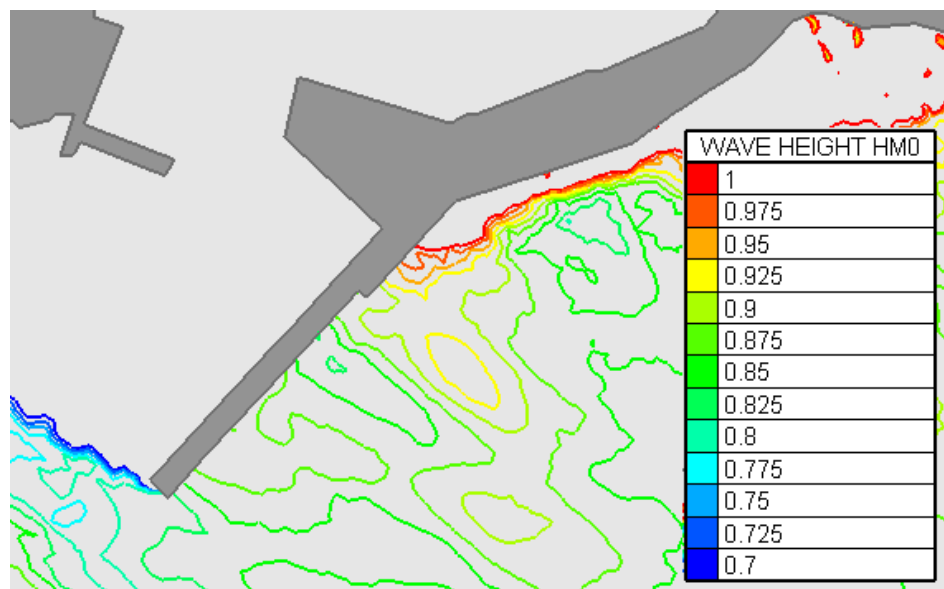


Fig 62. Detall de les isolínies dels valors  $K_s$  cada 0.025. (Font: BLUE KENUE).

Observant el detall dels valors  $K_s$  just davant de la zona de dic vertical, es pot determinar que els valors no segueixen un patró concret. Pel que segons la zona del dic el valor de Shoaling és diferent, i això comporta que el valor d'alçada d'ona sigui diferent. Es pot concloure que per a tenir uns resultats representatius, caldrà considerar diferents valors de  $K_s$  al llarg del dic exterior.

Com ja s'ha mostrat anteriorment el dic es pot dividir en 3 alineacions diferents, segons orientació i tipologia: Morrot, Mig i Costa. De manera equitativa, s'ha decidit prendre valors de Ks per certs intervals equidistants. D'aquesta manera es tindran diferents valors de Shoaling per analitzar els valors d'alçada que es poden arribar a produir i tenir uns resultats més representatius. Per altre banda, aquest procediment comporta analitzar la profunditat a cada interval que es prengui valor del coeficient.

ALINEACIÓ	TIPUS	LONG. (m)	INTERVAL (m)	NUM. INTERVALS
MORROT	Vertical	100	12	8
MIG	Vertical	45	11	4
COSTA	Talús	130	15	9

Per altre banda, també s'ha determinat a quina distància del dic es prendran els valors. S'ha exclòs la possibilitat de prendre els valors tangents al dic, donat que la interacció amb el peu del dic poden alterar i variar els valors, esdevenint poc representatius. Així que s'ha decidit prendre valors a una certa distància del dic, on la interacció amb el dic no es veu reflectida als valors de shoaling. Per altre banda, cal tenir en compte que el sistema de càlcul de Tomawac no té en consideració la reflexió de les onades amb el dic. Finalment s'ha considerat una distància d'entre 10 i 20 metres per a prendre valors de coeficient de shoaling.

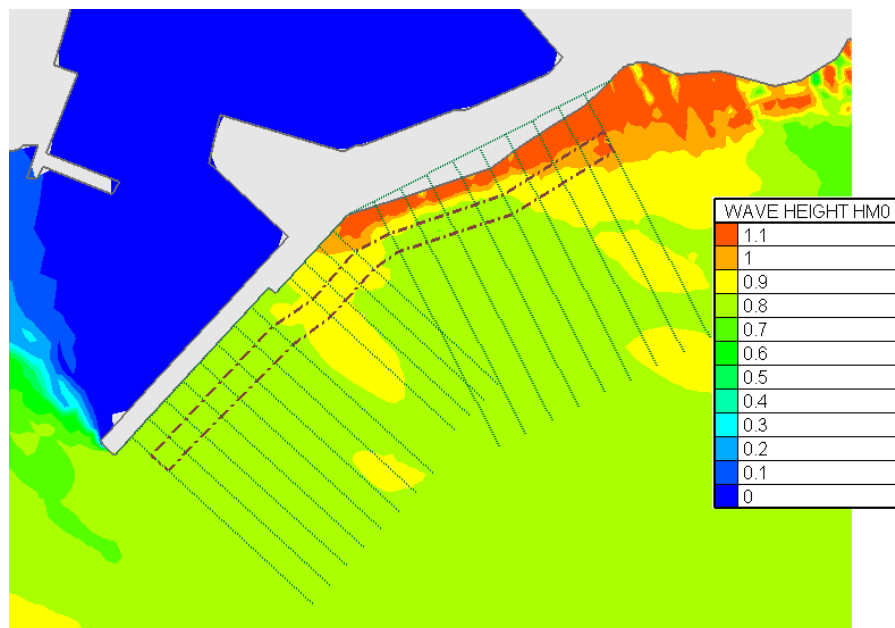


Fig 63. Zona determinada per a prendre els valors de Shoaling.. (Font: BLUE KENUE).

A continuació es presenten els coeficients de Shoaling utilitzats, classificats segons el sector del dic al que corresponen i la direcció principal de l'onatge.

		K_S SEGONS ANGLE ONATGE				
	DIRECCIONS	270	292.5	315	337.5	360
MORROT	1	0.691	0.854	0.895	0.835	0.652
	2	0.703	0.883	0.933	0.873	0.684
	3	0.706	0.887	0.943	0.894	0.721
	4	0.624	0.871	0.937	0.887	0.725
	5	0.667	0.869	0.931	0.888	0.716
	6	0.642	0.838	0.903	0.863	0.705
	7	0.642	0.835	0.913	0.863	0.711
	8	0.715	0.895	0.943	0.876	0.700
MIG	1	0.702	0.922	1.003	0.972	0.802
	2	0.724	0.915	1.017	0.989	0.860
	3	0.731	0.916	1.030	1.005	0.872
	4	0.803	0.908	1.021	0.983	0.879
COSTA	1	0.620	0.869	0.977	0.954	0.859
	2	0.597	0.832	0.906	0.889	0.768
	3	0.617	0.812	0.899	0.875	0.764
	4	0.641	0.854	0.934	0.900	0.756
	5	0.647	0.846	0.928	0.912	0.751
	6	0.687	0.891	0.983	0.935	0.769
	7	0.701	0.926	1.046	0.975	0.814
	8	0.697	0.937	1.081	1.028	0.876
	9	0.686	0.937	1.082	1.062	0.901

Fig 64. Coeficients de shoaling extrets amb Tomawac, segons sector i direcció d'onatge principal.

#### 2.4.1.1.2 Alçada d'ona per propagació, RESULTATS.

A continuació es presenten els valors d'alçada d'ona resultants d'aplicar a l'alçada d'ona de disseny en aigües profundes els coeficients de direccionalitat i shoaling. Els valors del coeficient de direccionalitat estan calculats a l'Apartat B.1, i s'utilitzaran els valors limitats al valor mínim.

		ALÇADA D'ONA PER PROPAGACIÓ				
	DIRECCIONS	270	292.5	315	337.5	360
MORROT	1	4.430	6.216	4.888	3.901	3.301
	2	4.504	6.427	5.094	4.076	3.466
	3	4.525	6.460	5.147	4.177	3.651
	4	4.001	6.345	5.116	4.141	3.673
	5	4.273	6.329	5.082	4.145	3.626
	6	4.117	6.104	4.929	4.030	3.572
	7	4.113	6.077	4.985	4.030	3.603
	8	4.581	6.516	5.148	4.089	3.546
MIG	1	4.501	6.715	5.477	4.538	4.060
	2	4.644	6.664	5.556	4.619	4.358
	3	4.685	6.672	5.626	4.691	4.419
	4	5.146	6.614	5.575	4.590	4.454
COSTA	1	3.975	6.325	5.337	4.453	4.351
	2	3.829	6.060	4.948	4.150	3.889
	3	3.956	5.913	4.911	4.088	3.868
	4	4.110	6.220	5.101	4.204	3.831
	5	4.145	6.161	5.069	4.258	3.806
	6	4.404	6.488	5.366	4.364	3.895
	7	4.494	6.744	5.713	4.552	4.123
	8	4.469	6.824	5.903	4.801	4.437
	9	4.398	6.822	5.909	4.959	4.564

Fig 65. Valors d'alçada d'ona de propagació per sector, alineació i direcció.

#### 2.4.1.2 ALÇADA D'ONA RESULTANT PER EFECTE DEL TRENCAMENT.

Entenem per trencament el fenomen de dissipació d'energia d'una onada per a condicions límits de la mateixa. Fins ara hem estudiat la propagació d'una onada, sempre mitjançant criteris analítics i formulacions matemàtiques ajustades. Però, un primer estudi d'aquestes formulacions matemàtiques, expressen que una onada no para de créixer quan menor es la profunditat que hi ha per sota, un cop està en aigües someres. Observant la realitat podem determinar que això no es cert. Una onada en apropar-se molt a la costa, en un determinat punt, aquesta perd la seva estructura, i disminuint la seva alçada va dissipant la seva energia. Aquest moment s'anomena trencament.

Cal tenir molt en compte aquest fenomen per a dos motius. En primer lloc, per a determinar correctament l'alçada d'ona amb la que l'onada incideix a la costa. En segon lloc, una onada que just inicia el trencament, està dissipant gran part de la energia en la direcció de la propagació. Aquesta energia descarregada en sentit horitzontal pot donar problemes en impactar directament amb la costa. Aquest augment de l'impuls s'ha de contemplar per a possibles estructures que hi poguessin haver en la zona de trencaments, i que poden patir danys importants per aquest motiu.

El trencament es donarà quan l'onada es torni inestable. Analitzarem la estabilitat d'una onada observant el seu pendent, es a dir, la relació entre la seva alçada i la seva longitud. Al 1880 Stokes va determinar que la estabilitat d'una onada es veuria condicionada en el

moment que la velocitat d'una partícula d'aigua situada a la cresta de l'onada fos major que la velocitat de l'onada. Tenint en compte aquestes consideracions, una onada trencar qualsevol estat del mar. Stokes va determinar que en aigües profundes, una onada que tingués un angle de cresta inferior als 120 graus es convertiria en inestable, i per tant trencaria.

— —

En aigües profundes es pot donar en estats de mar de tipus SEA on les freqüències que es solen tenir són molt elevades, el que genera alçades d'ona elevats i períodes petits. La longitud d'ona és funció directa del període, així doncs per períodes petits tindrem longituds d'ona petits.

D'altra banda, hem observat que una onada creix en alçada en aproximar-se a la costa, el que comporta que la relació alçada/longitud es vegi condicionada i pugui arribar a generar trencament. L'onada creix per efecte de la profunditat. En aproximar-se a la costa, la profunditat del fons marí disminueix, el que genera que afecti a l'onada, fent-la créixer ràpidament. Per tant, la profunditat del fons marí serà el condicionant principal per a determinar el trencament d'una onada. Altres aspectes de la costa, com el seu pendent, també són importants per determinar característiques del trencament, com la seva tipologia, i que es poden determinar amb el número d'Iribarren.

Pel present estudi tindrem en compte el trencament que es dona per efecte de la profunditat, ja que l'àmbit de l'estudi del port és a la costa, en zona de trencants per profunditats molt petites. Les fórmules per obtenir el trencament per efecte de la profunditat són nombroses. Cadascuna de les fórmules que es poden trobar s'han extret a partir d'estudiar el comportament d'un port real en un període de temporal, o a partir de realitzar proves a petita escala en models 2D i 3D. Es per aquest motiu que els resultats que s'obtinguin amb una fórmula determinada, es diferenciïn de la resta de formulacions que podem trobar. L'anàlisi detingut de la formulació a treballar serà molt important.

Tota fórmula calcula el coeficient de trencament com una relació entre la alçada d'ona i la profunditat en la que es produeix el trencament. Per tant, quan parlem de valors de trencament per profunditat, ens referirem al coeficient de trencament ( $\gamma_b$ ).

—

#### 2.4.1.2.1 Formulació utilitzada pel càlcul del trencament.

Pel present estudi s'han tingut en compte dos formulacions per a determinar l'alçada d'ona de trencament per efecte de la profunditat, les proposades per Goda (2000) i Melito (1998). Totes dues formulacions estan indicades per alçades d'ona significatives.

Goda presenta al 2000 una recull de formules per estimar el valor d'alçada d'ona dins de la zona de trencament, i diferencia el càlcul segons sigui en significatives o màximes. Dins d'aquest anàlisi que presenta, Goda ja compara els valors obtinguts de

trencament amb els valors que es donarien d'aplicar la propagació, obtenint així un valor definitiu. Goda extreu els seus resultats de nombrosos estudis i simulacions realitzades a petita escala, extraient-ne un criteri analític. A continuació es presenten les formulacions utilitzades.

Com es pot observar, Goda contempla en aquesta ocasió 3 alçades d'ona a tenir en compte. Les dues primeres opcions indiquen una alçada d'ona en trencament, i analitza la importància del període, el pendent de la costa i la profunditat d'anàlisi com a elements essencials a l'hora de determinar el trencament. El tercer valor com s'ha dit, és l'alçada per efecte de propagació. S'escull el valor mínim entre les tres possibilitats ja que els valors per sobre d'aquest mínim, per a la profunditat estudiada, no es podran donar.

Comentar que Goda utilitza la alçada d'ona en aigües profundes amb la correcció per refracció i per coeficient de direccionalitat ja aplicat, i que esdevé a la seva formulació la variable  $H'_o$ .

Aquesta formulació presentada està pensada per ser utilitzada només per alçades d'ones significants, per tant onatges irregulars. Si el nostre procediment de treball fos amb onatge regular la formulació es manté, però varien els valors de les constants.

I d'altra banda, també s'ha tingut en compte la formulació presentada per Melito (1998), també per alçades d'ona significatives. El criteri principal per haver triat aquesta formulació, igual que les de Goda, recau en que té en compte tant termes geomètrics de la costa, com és el pendent i la profunditat de càlcul, com característiques específiques de l'onatge, com és el període i l'alçada d'ona. A continuació es presenta la formulació de Melito 98'.

---

---

Amb la formulació de Melito s'obté directament el valor del coeficient de trencament Gamma, que relaciona l'alçada de trencament amb la profunditat a la que es produeix.

#### 2.4.1.2.2 Criteri d'anàlisi del càlcul del trencament.

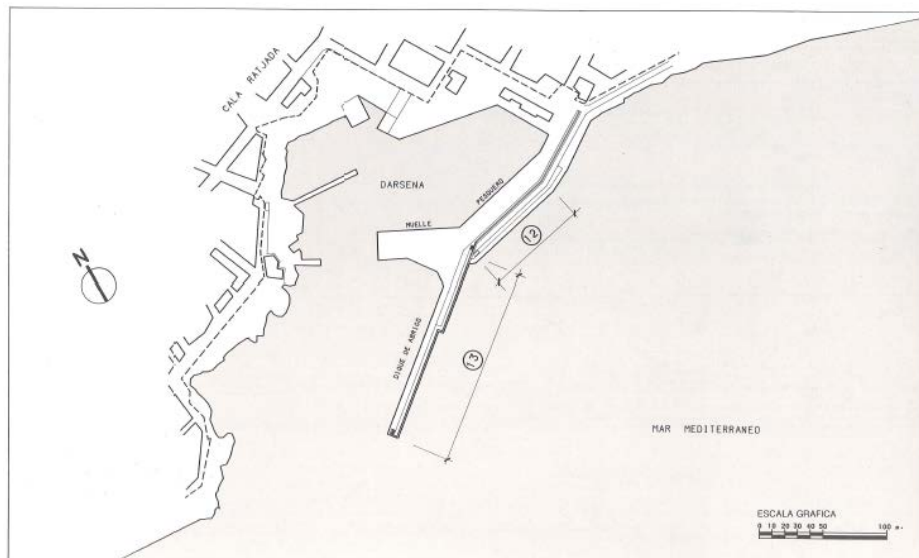
Determinar correctament l'alçada d'ona incident al dic exterior del port, tenint en compte les formulacions de trencament ha utilitzat, ha esdevingut un dels punts claus per a obtenir el valor d'alçada d'ona adequat. Com s'ha mencionat, l'objectiu principal d'aquest estudi és el d'analitzar el comportament del port en la situació real que viu en l'actualitat, demostrada la problemàtica que te en vers a temporals de llevant i el seu ultrapassament.

En primer lloc ens basem en informació obtinguda per diferents informes resultants d'experiments realitzats en canals. En aquests informes, determina que el valor del coeficient de trencament a utilitzar per alçades d'ona significants, oscil·la entre el 0,55 i el 0,65.

En segon lloc, diferents informacions recollides per part de Ports IB ens verifica quins van ser els valors de disseny que es van tenir en compte per a les últimes modificacions realitzades, com son els valors d'alçada d'ona en aigües profundes i l'alçada d'ona de disseny, per tant l'alçada d'ona incident al dic exterior.

Per les obres de construcció de l'última alineació, indicada amb el numero 13 a la planta general presentada a continuació, l'alçada d'ona pres a peu d'obra era de 4 metres.

#### **CALA RATJADA** **PLANTA GENERAL**



*Fig 66. Valors d'alçada d'ona de propagació per sector, alineació i direcció. (Font: Informe Ports IB).*

Anys més tard, els grans temporals posaven en evidència la insuficiència del valor de càlcul, ja que es donaven grans problemes d'ultrapassament. Aquest cas es donava al no tenir en compte el creixement de l'onada en interaccionar amb l'onada reflectida de l'alineació 12. Això obligava a tornar a calcular el valor d'alçada d'ona tenint en compte aquest efecte per augmentar la cota de coronació del dic. En aquest segon



càlcul s'obtenia un valor d'alçada d'ona de 4.90 metres, un augment mes que considerable, el que va obligar a fer créixer la cota 1 metre.

D'altra banda, un estudi de danys del mateix port de Cala Ratjada efectuat al Març del 2008 per una enginyeria, concloïa que per criteris d'ultrapassament, és necessari considerar un valor mínim d'alçada d'ona de càlcul de 5 metres.

Per últim, a partir d'observacions visuals i entrevistes amb els mateixos treballadors del port: agents portuaris, pescadors, treballadors del Club Nàutic. Tots ells confirmen que la zona de màxima concentració d'impacte es al llarg de la alineació 2, i la major quantitat d'ultrapassament és genera per les alineacions 1 i 2. Això porta a intuir que per dies de grans temporals, aquells de període de retorn molt elevat, les onades arriben en trencament tant per l'alineació 2 com per l'alineació 3. D'altra banda, per temporals de màxims anuals, segons com diuen les observacions visuals, a l'alineació 2 segueix arribant a trencant, mentre a l'alineació 3, habitualment no arriba a trencar l'onada. Tot i així, l'onada es queda en un estat inicial del trencament. Per efecte de la reflexió de la onada incident anterior, moltes vegades l'augment d'alçada d'ona per reflexió provoca que finalment l'onada trenqui just al xocar amb el mur exterior. les onades de la tercera alineació, tot i no arribar a trencant, es queden en un estat inicial d'aquest, tal com s'ha comentat, i que anomenem condicions impulsives.

Les formulacions de trencament utilitzades, Goda (2000) i Melito (1998), s'han escollit tenint en compte els criteris que comentats anteriorment, determinant quin valor de trencament aproximadament s'espera, i posteriorment comparar-lo amb el valor de propagació.

#### 2.4.1.3 ALÇADA D'ONA DE CÀLCUL. RESULTATS.

Seguint tots els passos i realitzant tots els càlculs que s'expliquen en l'apartat D.1, es pot acabar per determinar el valor d'alçada d'ona de càlcul a utilitzar pel càlcul de l'ultrapassament. A continuació es mostra una taula resumida amb els valors resultants d'alçada d'ona obtinguda per propagació per una banda, i per trencament, tant per la formulació de Goda com per la formulació de Melito.

Aquesta taula només conté els resultats finals d'alçada d'ona, per tal de poder analitzar la comparativa, ometent totes les variables utilitzades i que formen les fórmules calculades. I alhora, mostra quin valor s'escull com a alçada d'ona de càlcul i especifica quin de quin tipus d'onada es tracta, si es en trencament o en propagació. Cal tenir en compte, que només es presenten aquí els resultats final d'una sola direcció de les 5 estudiades. Es mostra només aquesta direcció donada que és la direcció amb la que s'obté un valor d'alçada d'ona de càlcul mes elevada, i per tant, seran els valors d'alçada d'ona que s'utilitzaran per als següents apartats.

La presentació dels resultats de la resta de direccions per poder realitzar una comparativa mes extensa, així com totes les variables que s'han tingut en compte es pot trobar al annex.

ALINEACIÓ MORROT (1)						
Sectors (12 m)	Prof.	H prop	H_b GODA	H_b MELITO	H_CALCUL	Tipus
1	8	6.250	5.765	5.496	<b>5.496</b>	Trencament
2	8	6.462	5.766	5.496	<b>5.496</b>	Trencament
3	8	6.496	5.766	5.496	<b>5.496</b>	Trencament
4	8	6.379	5.765	5.496	<b>5.496</b>	Trencament
5	8	6.364	5.765	5.496	<b>5.496</b>	Trencament
6	8	6.137	5.765	5.496	<b>5.496</b>	Trencament
7	7.5	6.110	5.460	5.264	<b>5.264</b>	Trencament
8	7.5	6.551	5.460	5.264	<b>5.264</b>	Trencament
ALINEACIÓ MIG (2)						
Sectors (11 m)	Prof.	H prop	H_b GODA	H_b MELITO	H_CALCUL	Tipus
1	7.5	6.752	5.461	5.264	<b>5.264</b>	Trencament
2	7.5	6.700	5.461	5.264	<b>5.264</b>	Trencament
3	7.5	6.708	5.461	5.264	<b>5.264</b>	Trencament
4	7.5	6.650	5.460	5.264	<b>5.264</b>	Trencament
ALINEACIÓ COSTA (3)						
Sectors (15 m)	Prof.	H prop	H_b GODA	H_b MELITO	H_CALCUL	Tipus
1	5	6.360	3.884	3.918	<b>3.884</b>	Trencament
2	5	6.093	3.884	3.918	<b>3.884</b>	Trencament
3	5	5.945	3.884	3.918	<b>3.884</b>	Trencament
4	5	6.254	3.884	4.040	<b>3.884</b>	Trencament
5	4.75	6.195	3.730	3.888	<b>3.730</b>	Trencament
6	4.75	6.524	3.787	3.888	<b>3.787</b>	Trencament
7	4.5	6.780	3.632	3.684	<b>3.632</b>	Trencament
8	4.25	6.861	3.478	3.479	<b>3.478</b>	Trencament
9	4	6.859	3.324	3.274	<b>3.274</b>	Trencament

Fig 67. Taula resultant de l'alçada d'ona de càlcul per la direcció ESE.

Analitzant els resultats es verifica, de manera aproximada, els criteris seguits pel càlcul de trencament i de l'alçada d'ona de càlcul que s'hauria d'obtenir per a garantir un valor real. Alhora, coincideix amb la informació que s'ha obtingut, on tal com es comentava, totes les onades incidents es troben en trencament per efecte de la profunditat, en el cas de que el període de retorn és de més de 100 anys..

#### 2.4.2. CÀLCUL DEL CABAL D'ULTRAPASSAMENT Q.

Una onada en moviment conté una certa quantitat d'energia, que va variant segons el seu estat, les onades amb les que interactua i segons l'afectació que té del fons marí, un cop no es troba en aigües profundes. Un cop aquesta onada incideix contra una estructura, aquesta onada patirà una variació de la energia, i que dependrà segons el tipus d'estructura que es trobi. En el cas d'incidir amb una estructura vertical i totalment impermeable, l'onada incident es veurà reflectida per l'estructura en un gran tant per cent, que dependrà de factors geomètrics d'aquest i de l'angle d'incidència. En tot cas, en el moment de contactar, en un determinat instant, tota la energia de l'onada, potencial (alçada d'ona) i cinemàtica (velocitat), es transformaran en potencial. El resultat es que, depenen de la fase en la que es trobi l'onada en el moment d'incidir, pot arribar a alçades d'ona molt elevats. D'altra banda, si l'onada incideix contra una estructura en talús amb blocs de formigó o escullera, l'onada tendirà a trencar, i en funció del tipus de trencament i de la permeabilitat

del talús, conservarà mes o menys energia. Normalment, aquest tipus d'estructura aconsegueix dissipar mes del 50% de la energia, però en el seu procés l'onada típicament trencarà en el algun punt, abans del talús, just a peu d'estructura o en mig del talús. El trencament de l'onada porta a dissipar l'energia potencial (alçada d'ona), i típicament en aquestes estructures, força part d'aquesta energia es converteix en energia cinètica. Amb aquest augment de la energia cinètica, l'onada te la capacitat de remuntar la estructura fins a cotes realment elevades, i conservant gran part de la velocitat. Si aquestes onades en trencament aconsegueixen interactuar amb el mur protector, aquest pot patir grans averies i gran part de l'aigua pot arribar a sobre passar la estructura.

Pels dos casos esmentats anteriorment, per estructures en talús i estructures en vertical, el fenomen on una onada escala i remunta la estructura es coneix com a Run-Up. Aquest paràmetre és vital per a poder dissenyar correctament qualsevol estructura protectora de la costa, ja que marcarà part de la operativitat del port o la activitat a la que s'estigui referint. Aquest paràmetre es mesura en metres de recorregut que fa la onada. El *Coastal Engineering Manual* defineix que es produeix ultrapassament quan per una certa onada o estat de mar, el Run-Up resultant és superior al franchord de l'estructura, entès aquest com la distància entre el punt més alt de l'estructura i el nivell del mar.

En aquest sentit l'ultrapassament es mesurarà com una certa quantitat d'aigua que supera la estructura i arriba dins de la zona d'abric. A l'hora de mesurar quantitativament l'ultrapassament podem analitzar dues variables diferents.

Per una banda, tenim el cabal d'ultrapassament "q", que correspon a un valor mig de tota la descarrega que es produeix per un cert estat de mar. Aquest paràmetre es mesura en unitat de cabal per metre lineal d'amplada. El cabal d'ultrapassament és la variable per estudiar aquest fenomen més estudiat i treballat. Tot i que, descriu l'ultrapassament com un fenomen constant en el temps en la durada d'un temporal, però, es conegut que no totes les onades que incideixen al dic exterior generen ultrapassament, i que per tant, la gran quantitat d'ultrapassament es concentrarà en un cert nombre d'onades, i en el volum d'aigua que cada una d'aquestes, arribi a ultrapassar la superestructura.

D'aquí el segon paràmetre que es sol estudiar en l'ultrapassament és el volum màxim de descàrrega que es pot arribar a produir per onada incident. Mesurat en metres cúbics, representa el volum total que pot arribar a descarregar una onada determinada. Aquesta variable es menys treballada, en tenir menys eines per a utilitzar-la. Es calcula a partir d'una funció probabilística d'excedència en un cert període de retorn. El principal motiu per a utilitzar el Volum Màxim d'ultrapassament per onada incident, és per aquells casos on la protecció interna al dic és el principal element condicionador. Exemples clars són aquelles ciutats construïdes sota el nivell del mar, instal·lacions i altres elements que per una certa quantitat de cabal poden arribar a danyar-se greument. Amb aquest paràmetre aconseguim trobar valors molt exactes, obtenint el màxim valor d'ultrapassament que es pugui donar per un determinat valor de temps de retorn. Per tant, obtenim valors més exactes, però que en la realitat es poden produir menys freqüentment.

Hi ha dos mètodes principals per a mesurar l'ultrapassament en un dic exterior, el mètode analític i el mètode físic. Donat que no es disposa de canal d'onades on efectuar les proves d'ultrapassament per mètode físic, pel present projecta s'utilitzarà el mètode analític per a determinar l'ultrapassament, i principalment només es treballarà amb el cabal d'ultrapassament "q".

Tant pels dos valors presentats, es determinant uns valors mitjos de cadascun, segons el risc que comporten. Ens basarem principalment en els valors que proposa l'EurOtop 2016, manual d'ultrapassament basat en un estudi europeu, però d'aplicació mundial. A continuació es presenten les 3 taules proposades per aquest manual, segons quin es el tipus de risc que es vol analitzar: estructural, material o seguretat civil.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V <sub>max</sub> (l per m)
Rubble mound breakwaters; H <sub>m0</sub> > 5 m; no damage	1	2,000-3,000
Rubble mound breakwaters; H <sub>m0</sub> > 5 m; rear side designed for wave overtopping	5-10	10,000-20,000
Grass covered crest and landward slope; maintained and closed grass cover; H <sub>m0</sub> = 1 – 3 m	5	2,000-3,000
Grass covered crest and landward slope; not maintained grass cover, open spots, moss, bare patches; H <sub>m0</sub> = 0.5 – 3 m	0.1	500
Grass covered crest and landward slope; H <sub>m0</sub> < 1 m	5-10	500
Grass covered crest and landward slope; H <sub>m0</sub> < 0.3 m	No limit	No limit

Fig 68. Valors d'ultrapassament per limitació per danys estructurals. (Font: EurOtop 2016)

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V <sub>max</sub> (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; H <sub>m0</sub> > 5 m	>10	>5,000 – 30,000
Significant damage or sinking of larger yachts; H <sub>m0</sub> = 3-5 m	>20	>5,000 – 30,000
Sinking small boats set 5-10 m from wall; H <sub>m0</sub> = 3-5 m Damage to larger yachts	>5	>3,000-5,000
Safe for larger yachts; H <sub>m0</sub> > 5 m	<5	<5,000
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; H <sub>m0</sub> = 3-5 m	<1	<2,000
Building structure elements; H <sub>m0</sub> = 1-3 m	≤1	<1,000
Damage to equipment set back 5-10m	≤1	<1,000

Fig 69. Valors d'ultrapassament per limitació de danys materials. (Font: EurOtop 2016)

Hazard type and reason	Mean discharge $q$ (l/s per m)	Max volume $V_{max}$ (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea.		
$H_{m0} = 3$ m	0.3	600
$H_{m0} = 2$ m	1	600
$H_{m0} = 1$ m	10-20	600
$H_{m0} < 0.5$ m	No limit	No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest		
$H_{m0} = 3$ m	<5	2000
$H_{m0} = 2$ m	10-20	2000
$H_{m0} = 1$ m	<75	2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

Fig 70. Valors d'ultrapassament per limitació en seguretat civil. . (Font: EurOtop 2016)

#### 2.4.2.1 FORMULACIÓ UTILITZADA EN EL MÈTODE ANALÍTIC DEL CÀLCUL DE L'ULTRAPASSAMENT.

Hi ha gran quantitat de fórmules proposades per calcular l'ultrapassament. La gran majoria d'aquestes expressions estan basades en estudis empírics realitzats en models a escala. Això comporta que la majoria de fórmules tinguin certes limitacions d'ús, condicionats per la geometria del dic i l'estat del mar característic. Si la estructura d'estudi no es mínimament equiparable a la estructura de càlcul utilitzada a la fórmula, no es pot assegurar la fiabilitat en els seus resultats. El mateix resultarà per l'estat de mar característic d'estudi de projecte. Aquestes característiques d'ús suposaran el principal determinant per a definir quina formulació s'utilitzarà en el càlcul d'ultrapassament.

Hi ha una clara distinció en les formulacions existents entre la tipologia de dic que pot haver. Per tant, trobarem una absoluta diferència entre les formulacions proposades pels dics en talús, dics compostos i dics verticals. D'altra banda, existeix un major nombre de formulacions per la tipologia en talús, donat que és una tipologia més utilitzada al llarg de la història, i no tant recent com si ho és el dic en vertical.

Així doncs a continuació es presenten les formulacions utilitzades segons tipologia de dic.

##### 2.4.2.1.1 Formulació d'ultrapassament per dics verticals.

En el present projecte, s'ha utilitzat les formulacions proposades per l'EurOtop 2016 pel que fa al càlcul del cabal d'ultrapassament en seccions de tipus vertical. La decisió d'utilitzar aquesta formulació ha vingut determinada per la poca coincidència dels models reals i les proves en canal, que oferien la resta de formulacions i estudis. El EurOtop 2016 ofereix un extens anàlisi de les diferents geometries que es poden trobar per cada estructura, així com els estats de mar que incideixen contra aquesta.

Per tant, dins del mateix manual EurOtop 2016, es poden trobar diverses formulacions que corresponen aquesta tipologia de dic. Per saber quina formulació és la més adequada s'han d'analitzar certes característiques, tant geomètriques, com de l'onada incident. A continuació es llisten aquestes característiques i quins han sigut els resultats del cas estudiat.

I. Afectació del fons marí.

En aquest primer punt s'analitza si l'onada incident es veu afectada pel fons marí. Aquesta condició dependrà de l'alçada d'ona, del seu període i de la profunditat del peu de la estructura. Tant sols que l'onada es trobi fora de la zona d'aigües profundes, aquesta es veu afectada pel fons .

En el present projecte, el dic extern es troba en zona de trencants, per tant **si te afectació del fons marí.**

II. Presència d'una considerable berma submergida a peu d'estructura.

La gran majoria de dics verticals recolzen els caixons sobre una berma de terres, que fa la funció principal de distribuir les càrregues de manera uniforme i minorades al terreny. Aquesta habitualment s'ajusta a la amplada del caixó, però es poden donar casos on aquesta berma guanya en amplada i importància. Dos casos trobarem per a trobar bermes majors i més prolongades. La primera és per una necessitat d'estabilitat. S'augmenta la berma per aconseguir més superfície on descarregar les càrregues. En segon lloc, aquesta berma, segons la fondària del peu de l'estructura, es pot prolongar fora de la costa per a afectar en major mesura a la onada incident, aconseguint frenar-la que trenqui abans de incidir contra el mur. Un anàlisi realitzat per Van der Meer i Bruce (2014), demostra que per un dic en vertical, la presència d'una berma considerable davant de l'estructura, pot influenciar clarament el resultat de l'ultrapassament. Aquesta influència només la trobem si l'alçada de la berma es superior al 60 % de la fondària del peu d'estructura.

Pel present estudi, **no tenim berma a peu d'estructura, per tant no tindrem cap influència en l'ultrapassament per aquest motiu.**

III. Condicions impulsives o no impulsives.

Aquesta és una condició molt important a l'hora d'estudiar l'ultrapassament en qualsevol tipus d'estructura. S'analitza el tipus d'onada que incideix en la característica de impulsivitat.

Fins ara, coneixem que una onada pot propagant-se o arribat el moment en trencant. Tal com s'ha comentat anteriorment, el trencament transforma la energia potencial de l'onada, descrita en funció de l'alçada d'ona, per una força de caràcter principalment horitzontal. Aquesta transformació es coneix com impuls de la onada per trencament, i indica que la onada té una força en horitzontal considerable. Les condicions impulsives es donaran per totes aquelles onades que estiguin en trencant, i també es donaran per aquelles onades que estiguin molt a prop de trencar, i la transformació de la energia ja s'ha iniciat pels primers indicis d'inestabilitat.

Per tant, guanya especial rellevància aquesta condició pel que fa a l'ultrapassament en dics verticals. Una onada que no està en condicions impulsives, en incidir amb un parament vertical, la màxima alçada que aconseguirà serà molt similar a l'amplada de fase que tenia poc abans d'incidir, ja que l'energia es manté en un 90-95%. Però per condicions impulsives, l'onada a guanyat energia cinètica, pel que augmentarà el Run-Up que es pugui generar, fent que les alçades que es puguin donar al dic siguin molt majors que l'amplada de fase de l'onada.

Una onada serà impulsiva en funció de la seva alçada d'ona, el període i la profunditat de càlcul que s'estigui utilitzant. A partir de la següent relació determinem si una onada es troba en impulsives o no.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Pel present projecte, en la combinació més desfavorable per a condicions d'ultrapassament, per tant, amb les alçades d'ona majors, **totes les onades incidents al dic extern són impulsives.**

IV. Tipus de relació entre alçada d'ona i alçada absoluta del dic extern.

Només per aquells casos on ens trobem en condicions d'ona impulsiva procedirem a examinar aquest pas. Segons la formulació que presenta el EurOtop 2016 per aquest tipus de dics, aquesta distinció es fa necessària donat a que una sola fórmula no podia representar correctament l'ultrapassament en les dues situacions.

Aquesta es una condició tant geomètrica com de estat de mar, ja que en aquesta relació s'examina tant la alçada d'ona com l'alçada absoluta del dic exterior. Examinant la relació que es presenta a continuació, es classifica el segons si l'alçada del mur exterior es alta o baixa en funció de l'alçada d'ona en aigües profundes. Per a cada tipus de classificació la fórmula a utilitzar serà diferent. És important fer aquesta distinció, ja que son tipologies de formules diferents, i el seu comportament es notòriament diferent segons el valor de la variable de càlcul, en aquest cas la relació  $R_c/H_{mo}$ . Per a determinar quin tipus de dic és partirem de la següent relació.



Quan s'estudia aquesta relació al llarg d'un dic, cal tenir en compte els diferents punts del dic, doncs l'onada incident, mai serà la mateixa per tot el dic. **Pel present projecte, per totes les onades incidents a llarg del dic vertical, es considera un dic de tipologia BAIXA.**

Definides totes aquestes variables, la fórmula que suggereix el manual EurOtop 2016 per calcular l'ultrapassament en un dic vertical és la següent.

$$\frac{Q}{H_{mo}^{3/2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{H_{mo}}{H_{rel}}}}$$

#### 2.4.2.1.2 Ultrapassament per dics Verticals, RESULTATS.

A partir de la formulació presentada anteriorment pel càlcul de l'ultrapassament en dics verticals proposada pel manual EurOtop 2016 s'ha calculat l'ultrapassament en la situació mes desfavorable. Les alçades d'ona utilitzades són les mateixes que les presentades en l'apartat D1.3. Només utilitzarem aquesta formulació per aquelles alineacions on presentin una tipologia de dic en vertical i amb les característiques que anteriorment s'han definit.

A continuació es presenten els cabals d'ultrapassament resultants d'aplicar la formulació esmentada. El cabal està en metres cúbics per segon (m<sup>3</sup>/s).

<b>ALINEACIÓ MORROT (1)</b>						
Sectors (12 m)	Prof.	Hmo	Cond. Hmo	Rel	Q (m3/s)	Tipus
1	8	5.496	IMPULSIVE	1.274	<b>0.093</b>	DIC BAIX
2	8	5.496	IMPULSIVE	1.274	<b>0.093</b>	DIC BAIX
3	8	5.496	IMPULSIVE	1.274	<b>0.093</b>	DIC BAIX
4	8	5.496	IMPULSIVE	1.274	<b>0.093</b>	DIC BAIX
5	8	5.496	IMPULSIVE	1.274	<b>0.093</b>	DIC BAIX
6	8	5.496	IMPULSIVE	1.274	<b>0.093</b>	DIC BAIX
7	7.5	5.264	IMPULSIVE	1.330	<b>0.077</b>	DIC BAIX
8	7.5	5.264	IMPULSIVE	1.330	<b>0.077</b>	DIC BAIX
<b>ALINEACIÓ MIG (2)</b>						
Sectors (11 m)	Prof.	Hmo	Cond. Hmo	Rel	Q (m3/s)	Tipus
1	7.5	5.264	IMPULSIVE	1.330	<b>0.077</b>	DIC BAIX
2	7.5	5.264	IMPULSIVE	1.330	<b>0.077</b>	DIC BAIX
3	7.5	5.264	IMPULSIVE	1.330	<b>0.077</b>	DIC BAIX
4	7.5	5.264	IMPULSIVE	1.330	<b>0.077</b>	DIC BAIX

Fig 71. Cabal d'ultrapassament per alineacions amb dic verticals.

#### 2.4.2.1.3 Formulació d'ultrapassament per dics compostos, talús amb mur de coronació.

Com s'ha comentat anteriorment, son nombrosos els estudis sobre dics en talús, però alhora la composició geomètrica és més complexa. Fent un seguiment pels principals manuals d'estudi, *Manual EurOtop 2016* i el *Coastal Engineering Manual (CEM)*, trobem una gran varietat de formulacions que dependran, principalment, de la tipologia geomètrica del dic en talús.

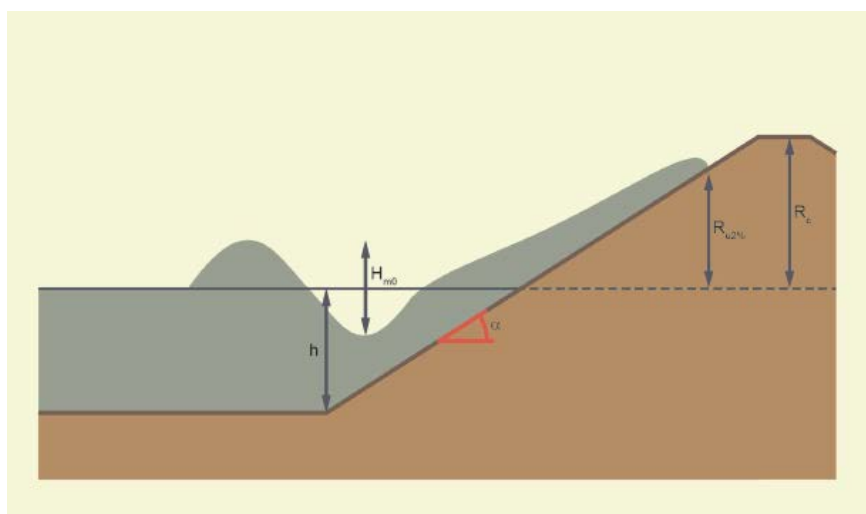
En primer lloc podem distingir dos característiques principals, per una banda la seva definició geomètrica i dels seus elements estructurals. I d'altra banda, el tipus de material que s'arriba a utilitzar per a crear el talús exterior. Són dos característiques que s'han de definir en qualsevol dic per a seleccionar la correcta formulació a utilitzar.

D'altra banda, la gran majoria de formulacions que presenten aquests estudis han sigut realitzats en models reals. Ja sigui estudiant un cert nombre de ports un els característiques geomètriques són similars, i amb un estat d'onatge real. Com estudiant el comportament de dics realitzats a escala reduïda i testats en canals de prova. La principal diferència a destacar entre les dues tipologies d'estudi és que pels ports reals, son menys les onades i temporals estudiats, i per tant, el rang d'aplicació pel que fa al estat de mar incident, sol ser molt reduït. En contra, si es tenen les condicions i característiques coincidents, els resultats que es poden obtenir són de major fiabilitat.

A continuació es defineixen les classificacions per a dics compostos en detall.

#### **2.4.2.1.3.1 CLASSIFICACIÓ GEOMÈTRICA DELS DICS EN TALÚS EN EL CÀLCUL DEL CABAL D'ULTRAPASSAMENT.**

Pel que fa a les característiques geomètriques del dic en talús podem trobar 3 grups. En primer lloc descriuríem la forma més bàsica on es construeix un dic amb un talús constant fins arribar al fons marí. En la coronació del dic trobem una explanada, típicament del mateix material que la part externa, i a vegades amb revestiment de formigó o altres materials, quan se li vol donar una funció característica de cara al usuari.



*Fig 72. Esquema dic en talús simple. EurOtop 2016.*

En segon lloc trobaríem aquells dics que a meitat del talús presenten una berma. La berma la definim com un interval de terreny en el talús exterior, on es disminueix el pendent del talús considerablement, normalment arribant a la horitzontalitat. Aquestes bermes tenen la funció de allargar el run-up de l'onada, aconseguint que la cota de coronació absoluta del dic, no sigui tant elevada. Aquesta berma, tant pot ser horitzontal com inclinada, i alhora, tant pot estar submergida com per sobre del nivell del mar.

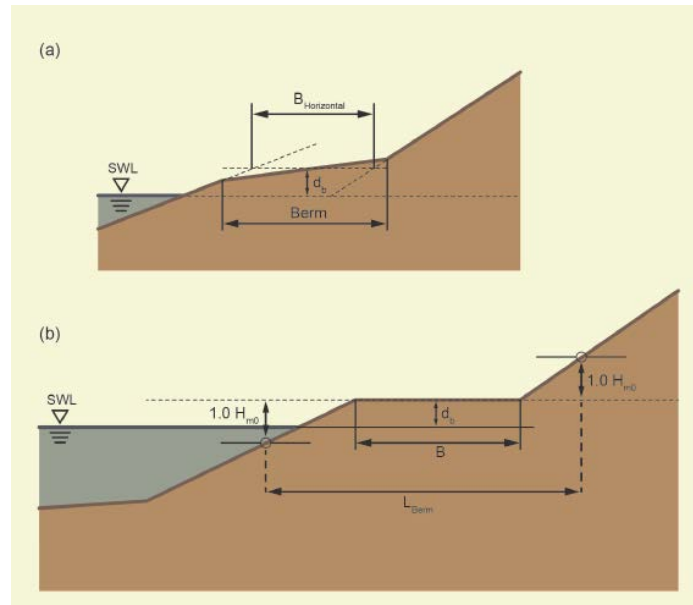


Fig 73. Esquema dic amb berma anterior. EurOtop 2016.

Per últim, podent-se donar que tenim un dic en talús sense berma com amb berma, l'últim gran grup de la classificació geomètrica es caracteritza per la col·locació d'una superestructura de parament vertical en la coronació del dic. Amb la col·locació de aquesta superestructura aconseguim reduir la cota de coronació que obtindríem si tinguéssim una coronació plana, evitant igualment el màxim ultrapassament possible de les onades. Paral·lelament, també aconseguim reduir l'amplada del dic, el que representa un gran estalvi en el moviment de terres a crear, així com la millora de la viabilitat en construir aquest tipus de dic. Anomenem aquest tipus de dics, com a dics compostos, en combinar una part en talús i una altre en parament vertical.

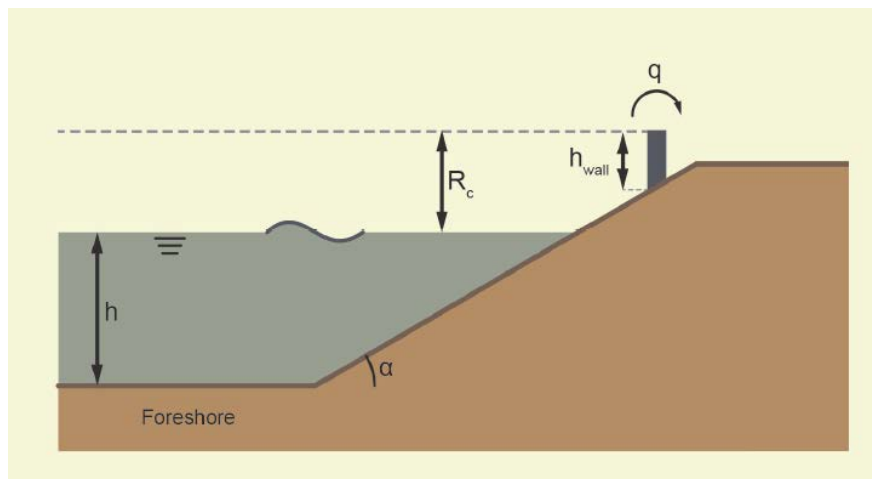


Fig 74. Esquema dic compost sense berma. EurOtop 2016.

Pel present projecte, la estructura del dic en talús és de tipus compost, amb una berma horitzontal davant de la superestructura.

#### 2.4.2.1.3.2 CLASSIFICACIÓ SEGONS TIPUS DE MATERIAL DE LA BERMA EXTERIOR.

En aquesta classificació s'estudia el material amb el que s'acaba el mantell principal en la zona exposada al onatge. Estudiant els diferents tipus de dics en talús existents, podem crear únicament dos grans grups, on cada grup engloba diferents materials.

En primer lloc trobem els dics permeables. Aquest tipus de dics estan formats per blocs d'escullera natural d'un diàmetre definit, o per blocs de formigó prefabricats, de forma i dimensions a determinar. Aquests blocs es col·loquen en la part del talús exposada al onatge, deixant que l'aigua passi entre els blocs. Aquesta permeabilitat fa que un cert volum d'aigua desplaçat per una onada, es concentri en aquesta porositat característica, disminuint en la quantitat total d'aigua que es capaç d'arribar a la cota de coronació. A més a més, dissipa la energia de l'onada en un recorregut més petit. Per contra, aquest tipus de dics poden ser menys durables en el temps si no es fa una supervisió constant de l'estat dels blocs i de l'estat del talús. La col·locació dels blocs ha de assegurar una permeabilitat alta, però al mateix moment, ha d'assegurar la estabilitat del mateix talús, i que per tant amb tornada de l'onada un cop trencada (Set-Down), els blocs no es moguin de lloc i es desmunti tota la estructura del talús.

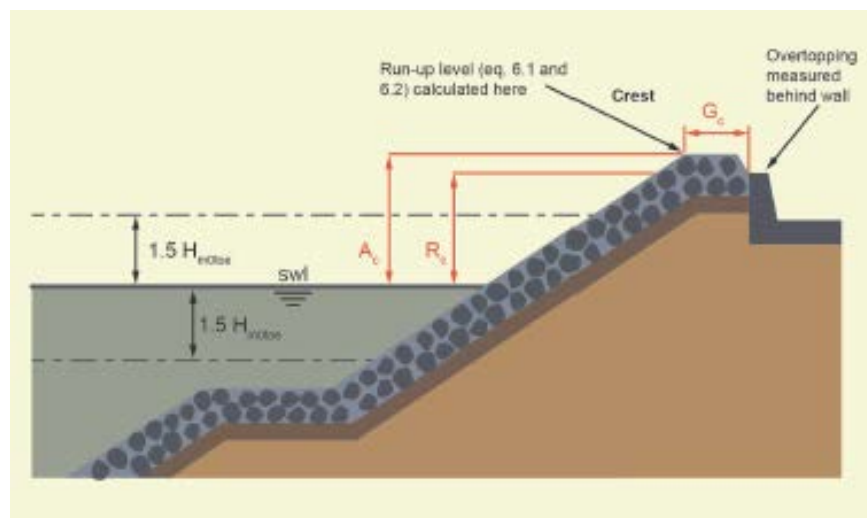
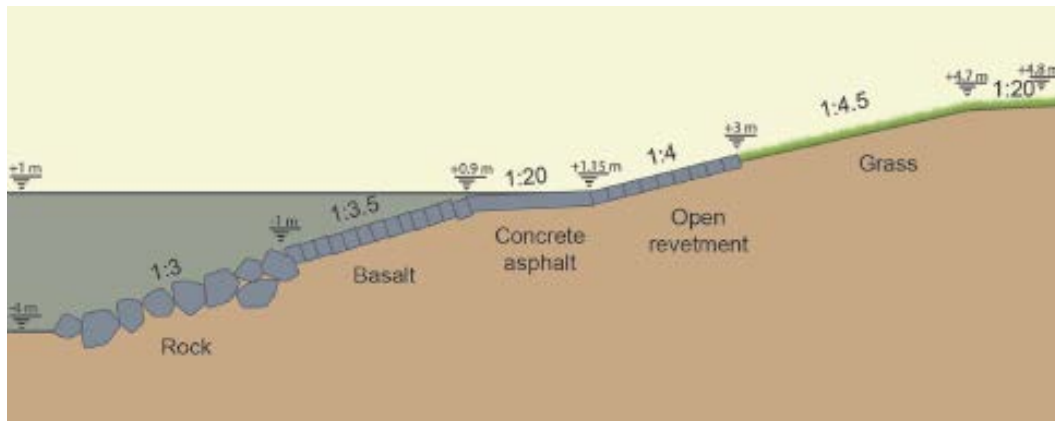


Fig 75. Esquema dic escullera natural. EurOtop 2016.

En segon lloc trobem els dics classificats com a impermeables. Aquests dic tenen un mantell exterior menor del que solen tenir la resta de dics, però inclouen una ultima capa, un revestiment d'un material llis, majorment impermeable. La principal idea per a executar un dic en talús amb material revestit, es la d'aconseguir un impacte ambiental i paisatgístic menor. Sempre s'executaran aquests dics amb pendents molt petits, de manera que la onada te un trencament de tipus Spilling, de manera que va dissipant la seva energia de forma continuada i constant. Amb aquest tipus de

trencament l'onada no genera grans columnes d'aigua, i per tant, no es fa necessari instal·lar, en molts casos, una superestructura a la coronació per evitar l'aigua que pot venir en spray.



*Fig 76. Esquema dic revestit. EurOtop 2016.*

Típicament el material d'aquest revestiment es definirà segons la funció que pugui tenir el mantell exterior o la coronació del mateix dic. Per això els materials que mes es solen trobar són, gespa per disminuir el impacte ambiental i paisatgístic, formigó per a majorar la seguretat del dic, i asfalt, normalment quan s'afegeix una berma horitzontal, transitable en dies sense risc de gran onatge.

Pel que fa al revestiment de formigó, podem trobar per una banda un revestiment de formigó en massa executat in situ, creant una superfície llisa. D'altra banda, podem trobar un sistema de revestiment a partir de blocs de formigó. La idea d'aquest sistema es fer una col·locació especials dels blocs de tal manera que ofereixin una rugositat major, d'aquesta manera aconseguir frenar l'onada més ràpidament, i aconseguir cotes de coronació mes petites.



*Fig 77. Exemples reals de revestiments de dics impermeables i bermes. . (Font: EurOtop 2016)*

Pel present projecte, la tipologia de material que està format el mantell del dic exterior és d'escullera natural.

#### 2.4.2.1.4 *Ultrapassament per a dics Compostos, RESULTATS.*

Resumint, pel present projecte, pel que fa a l'alineació on trobem el dic en talús, el definirem com a dic en talús de tipus compost, talús mes superestructura, de revestiment d'escullera natural i conté una berma horitzontal per sobre del nivell del mar, a la mateixa cota i just abans del mur de coronació. Amb aquestes característiques definies, podem definir la formulació que millor s'ajusti aquestes característiques.

Per a fer el càlcul del cabal d'ultrapassament per un dic en talús s'han tingut en compte diferents estudis i manuals. S'han estudiat les propostes presentades en el Manual EurOtop 2016, el CEM (Coastal Engineering Manual), l'estudi "*Diseño del espaldón de los diques rompeolas*" per Jose Maria Berenguer (Berenguer Ingenieros, S.L.) i Antonio Baonza (CEDEX) (1995) i un estudi Danés sobre l'Ultrapassament en dics d'escullera (1998). La formulació escollida es troba dins de les pel CEM.

La formulació escollida és la proposada per Bradbury i Allsop (1988) per a dics en talús recte de escullera amb superestructura de tipus mur i una berma just davant del mur. Però s'ha escollit agafar els coeficients característiques d'aquesta formulació que proposen Aminti i Franco (1988), per al mateix tipus de dic, però inclou tot tipus de revestiment permeable, però sent el nucli impermeable. A més amb aquesta formulació només s'ha tingut en compte un sol estat de mar, a partir de l'espectre de JONSWAP, el mateix tipus d'espectre amb el que s'han calculat els valors de Tomawac. Aquesta formulació ha estat escollida tant per donar valors coherents com pel fet que la gran majoria de rangs d'aplicació per característiques geomètriques i d'onatge són acceptats.

A continuació es presenta la formulació proposada, així com un esquema de dic i dels rangs d'aplicació que s'han de tenir en compte.

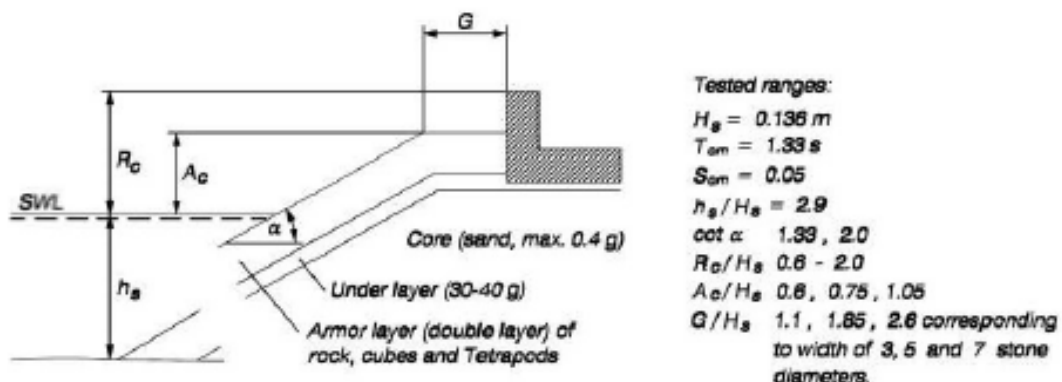


Fig 78. Formulació Bradbury i Allsop. Esquema i rang d'utilització. . (Font: CEM Capítol VI)



Així doncs aquets són els valors que s'obtenen d'aplicar aquesta formulació en el present dic .

ALINEACIÓ COSTA (3)					
Sectors (15 m)	Prof.	H <sub>m0</sub>	Cond. H <sub>m0</sub>	G/H <sub>s</sub>	Q (m <sup>3</sup> /s)
1	5.5	4.192	IMPULSIVE	1.431	0.008
2	5.5	4.192	IMPULSIVE	1.431	0.008
3	5.5	4.192	IMPULSIVE	1.431	0.008
4	5	3.884	IMPULSIVE	1.545	0.005
5	4.8	3.761	IMPULSIVE	1.595	0.004
6	4.8	3.817	IMPULSIVE	1.572	0.005
7	4.8	3.817	IMPULSIVE	1.572	0.005
8	4.8	3.816	IMPULSIVE	1.572	0.005
9	4.8	3.816	IMPULSIVE	1.572	0.005

Fig 79. Cabal d'ultrapassament per alineacions amb dic en talús.

## 2.5. RESULTATS DE L'ANÀLISI

Un cop determinades les fórmules i calculats els cabals d'ultrapassament en tots els sectors i alineacions del dic d'estudi, analitzarem els seus valors, per donar-los per vàlids i treure'n les respectives conclusions.

### 2.5.1. LÍMITS TOLERABLES D'ULTRAPASSAMENT.

La principal funció de fer aquest estudi de resultats és poder determinar si l'actual disseny del dic d'abric del port de Cala Ratjada compleix amb els requisits que hauria de complir o no. Per tant, en primer lloc definirem quins son els rangs d' ultrapassament que podem admetre al present port. Seguint la taula definida pel Manual EurOtop 2016, presentada a l'apartat D.2 podem determinar, segons tipologia del dic, quins són els valors màxims tolerables. Aquests límits es determinen tant per cabal d'ultrapassament com de volum màxim d'ultrapassament per onada. En el present projecte només analitzarem el valor de cabal d'ultrapassament. A continuació exposem de nou les taules utilitzades, en aquest estudi només es tenen en compte dues de les 3 taules presentades.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V <sub>max</sub> (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; H <sub>m0</sub> > 5 m	>10	>5,000 – 30,000
Significant damage or sinking of larger yachts; H <sub>m0</sub> = 3-5 m	>20	>5,000 – 30,000
Sinking small boats set 5-10 m from wall; H <sub>m0</sub> = 3-5 m Damage to larger yachts	>5	>3,000-5,000
Safe for larger yachts; H <sub>m0</sub> > 5 m	<5	<5,000
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; H <sub>m0</sub> = 3-5 m	<1	<2,000
Building structure elements; H <sub>m0</sub> = 1-3 m	≤1	<1,000
Damage to equipment set back 5-10m	≤1	<1,000

Fig 80. Valors d'ultrapassament per limitació de danys materials. . (Font: EurOtop 2016)



Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V <sub>max</sub> (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea.		
H <sub>m0</sub> = 3 m	0.3	600
H <sub>m0</sub> = 2 m	1	600
H <sub>m0</sub> = 1 m	10-20	600
H <sub>m0</sub> < 0.5 m	No limit	No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest		
H <sub>m0</sub> = 3 m	<5	2000
H <sub>m0</sub> = 2 m	10-20	2000
H <sub>m0</sub> = 1 m	<75	2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

Fig 81. Valors d'ultrapassament per limitació en seguretat civil. . (Font: EurOtop 2016)

Per a ser més específics, determinarem els límits de cabal segons alineació, ja que entre elles poden veure's diferències en tipologia i funcionalitat.

Pel que fa a la alineació morrot, format per un dic en vertical completament, i amb la principal funció de moll de trànsit, només tindrem les limitacions referides a seguretat per a embarcacions. A més aquesta alineació justament, està recentment convertida per a rebre principalment embarcacions de més d'entre uns 9 i 20 metres d'eslora, en instal·lar una línia de mort d'amarratge a major distància de la que hi havia en el passat. Per tant, el valor que prendrem per cabal d'ultrapassament tolerable oscil·larà entre el crític per embarcacions petites i llargues.

Analitzem a continuació la alineació del mig, de composició vertical però amb menys fondària al peu d'estructura en comparació de la alineació del morrot. Però la funcionalitat d'aquest dic és diferent. A la zona que protegeix hi ha situades diverses instal·lacions dels serveis del port i dels pescadors, així com un restaurant i una caseta de turisme. Per tant s'ha de tenir en compte la protecció de edificis i instal·lacions per a aquesta alineació, tenint en compte que aquestes instal·lacions es troben a una certa distància.

Per últim, analitzem l'alineació més propera a la costa, de tipus dic en talús. Darrere del mur d'aquesta alineació s'ha d'assegurar el pas de cotxes i persones així com la seguretat al no enfonsament de petites embarcacions, d'entre 4 a 8 metres majoritàriament. Però aquest segon aspecte cal tenir en compte la distància existent entre el mur de protecció i l'amarratge de les barques, que és d'uns 11,5 metres. I alhora la distància absoluta des de l'inici de la berma, punt on s'origina el principi d'ultrapassament, fins al límit del moll

intern, que és de 24 metres. Amb aquests aspectes es pot obtenir un valor relativitzat del cabal que s'ha d'obtenir.

## 2.5.2. CABALS D'ULTRAPASSAMENT D'ESTUDI.

El següent pas per a realitzar l'anàlisi de resultats serà comprovar els valors de cabals d'ultrapassament obtinguts amb les formulacions presentades al llarg del apartat D.

En primer lloc extreure'm els valors màxims per cada una de les alineacions estudiades (morrot, mig i costa). Prendrem aquest valor màxim com a referent per tractar el ultrapassament característic de la alineació en general, ja que per tipologia i per funcionalitat, tota l'alineació tindrà les mateixes limitacions. Per tant, els valors màxims seran els més restrictius en aquesta consideració.

Caudals Màxims	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q (l/s)
MORROT	0.093	93
MIG	0.077	77
COSTA	0.012	12

Els cabals que s'acaben de presentar, representen el cabal màxim per un sector en concret de cada alineació. Com s'ha comentat anteriorment, calculem el cabal d'ultrapassament per sectors ja que no en tots els punts del dic es produeix el mateix ultrapassament, així doncs cal ajustar aquests valors a un valor mig pel sector sencer. Mitjançant la mitjana entre la interpolació lineal entre els valors consecutius obtenim un valor de cabal d'ultrapassament per cada sector.

Examinant els valors resultants que es presenten al apartat D, podem veure que els valors màxims de cabal d'ultrapassament es donen en sectors consecutius d'una mateixa alineació, i per tant, la interpolació no es necessària en aquest cas. Això sol passar per a situacions on les onades arriben a trencar just abans de xocar amb el dic, com és el cas actual.

### 2.5.2.1 COHERÈNCIA DE RESULTATS.

No és un procés fàcil el de determinar la coherència dels valors obtinguts sense tenir resultats reals dels que partir. Per tant, s'anirà determinant la coherència dels valors obtinguts a partir de petits anàlisis concrets.

#### 2.5.2.1.1 *Diferència entre talús i vertical*

La primera observació que es pot fer, és la gran diferència entre els valors obtinguts als dics verticals, alineacions del morrot i mig, amb els valors obtinguts a la alineació més popera a la costa, de dic en talús. Així com entre les dues primeres alineacions la

diferència és de 2 litres per segon, en comparativa amb el dic en talús, la diferència es de més de 90 litres per segon.

Per una banda, cal destacar que l'alçada d'ona incident al dic és molt inferior per l'alineació en talús en comparativa de l'alçada d'ona de càlcul del dic en vertical. L'alçada d'ona de càlcul és el valor principal en el càlcul de l'ultrapassament, el que implica que aquesta diferència d'alçada d'ona sigui la principal responsable entre la diferència entre els valors de cabal d'ultrapassament. Si utilitzem la mateixa alçada d'ona per totes dues formulacions les diferències encara estan presents, però aquesta diferencia es redueix considerablement.

D'altra banda, la onada que arriba al llarg de tot el dic d'abric d'aquest port es troba en condicions impulsives, aquest és un fet important a tenir en compte. Per una cota de coronació molt similar en tots dos tipus de dics, el de tipus en talús està més protegit al ultrapassament que no pas el vertical. L'energia que està acumulant en aquell moment es dissipa al llarg del talús en zona de trencants. El tipus de ultrapassament que acostumarà a generar serà de tipus spray, però s'està originant a una certa distància del mur de protecció. En canvi, per un dic en vertical, el xoc es produirà directament sobre el mur. La columna d'aigua que es crea en xocar amb la estructura, és més elevat, ja pel fet que no ha perdut energia l'onada abans del xoc. D'altra banda, tota la columna d'aigua que superi la cota del mur, acabarà ultrapassant la estructura. En resum, per estats de mar amb onades impulsives cal tenir cotes de coronació del mur de protecció més elevades pels dics verticals que no pas pels dic en talús. Una pujada de 2 metres el mur exterior comporta una disminució del 50% de l'ultrapassament calculat.

#### 2.5.2.1.2 Comparativa amb l'observació de realitat.

Actualment al port de Cala Ratjada es registren problemes d'ultrapassament cada any en més d'una ocasió. En la gran majoria d'aquestes ocasions alguna part del port no pot donar el servei al que està destinat per excessiva perillositat.

Segons entrevistes realitzades a diferents usuaris del port durant els darrers anys, i alhora per experiència pròpia, les majors quantitats d'ultrapassament es produeixen a les alineacions amb dic vertical. Per la alineació amb dic en talús l'ultrapassament que es sol observar és més puntual, sent molest i arribant algunes vegades a ser perillós. A continuació es mostren imatges de la part interna del dic, part destinada a donar servei, tant per la tipologia en talús com la de tipus vertical, obtingudes durant el mateix temporal.



*Fig 82. Ultrapassament zona interna dic en talús. (Font: Video Youtube).*



*Fig 83. Ultrapassament zona interna dic en vertical. (Font: Video Youtube).*

Amb aquestes imatges es pot veure perfectament que el cabal d'ultrapassament que es dona habitualment a la realitat coincideix en part amb la diferència quantitativa entre les dues tipologies de dic. Si en el dic en talús tenim un ultrapassament incòmode i puntualment perillós, com es pot veure en la imatge, pel dic en vertical l'ultrapassament que es dona és realment perillós, tant per persones, vehicles transitant, embarcacions petites, i part de les embarcacions grans segons eslora.

D'altra banda, el que també pot sorprendre dels valors que s'obtenen és que pels dics en vertical els cabals són realment molt elevats. D'aquí podem extreure'n dos observacions.

En primer lloc, els valors que es calculen mitjançant totes les fórmules presentades (ultrapassament, trencament i propagació de l'onada) estan fetes en base de la hipòtesi inicial de risc i vida útil, que correspon a un període de retorn de 36 anys. Si per la informació recollida obtenim que es donen períodes d'ultrapassament més d'un

cop per any, i mínim un d'aquests períodes és realment remarcable, es pot assegurar que els valors que s'obtenen amb les formulacions utilitzades són més elevats que els poden observar habitualment a la realitat.

En segon lloc, cal observar amb molt detall les diferents fotografies que es poden trobar pel que fa a l'ultrapassament per la zona del dic en vertical els darrers anys. Segons fonts del mateix port, preocupats per aquesta situació, asseguruen que els volums d'ultrapassament que es poden observar a continuació són habituals un cop per any com a mínim.



*Fig 84. Exemple d'ultrapassament tipus spray al morrot. (Font: Ports IB).*



*Fig 85. Exemple d'ultrapassament tipus spray sobre zona d'instal·lacions, a la 2a alineació. (Font: Video Youtube).*



Observant aquestes imatges, sabent que la freqüència d'aquestes eventualitats és major en la realitat del que s'espera per càlcul de disseny, es pot arribar a deduir que els valors de cabal d'ultrapassament a calcular han de ser realment molt elevats per aquesta alienació.



*Fig 86. Exemple d'ultrapassament tipus spray sobre zona del morrot. (Font: CN Cala Ratjada)*



*Fig 87. Exemple d'ultrapassament per la zona de dic vertical. (Font: Diari de Mallorca)*

A continuació també es mostra altres problemes generats pels onatges que s'han estudiat en el present projecte, durant períodes de temporal on els ultrapassaments han sigut molt elevats, però també s'han observat problemes estructurals importants, i que cal destacar.

Es pot veure en aquesta primera imatge, el trencament del dic en la seva segona alineació, sobre el sector 3, zona on acumula més energia. En aquest cas una onada va

acabar per trencar l'estructura, fent un forat a cota d'aigua gairebé de 9 metres quadrats. Aquest problema ha portat a una immediata reparació d'urgència.



*Fig 88. Trencament del mur en la 2a alineació durant temporal de 21 de Gener del 2017.  
(Font: Diari de Mallorca)*



*Fig 89. Exemple de problemes estructurals en el dic exterior. (Font: CN Cala Ratjada)*

En aquesta segona imatge es pot veure un problema estructural de trencament del formigó per fatiga. Al requadre marcat de color groc es pot veure un considerable raig d'aigua sortint d'una esquerda existent al dic. Aquesta esquerda va d'un costat da l'altre i té una considerable longitud vertical. Es comprova la gravetat d'aquesta esquerda en veure la quantitat d'aigua que la travessa abans que l'aigua de l'onada passi per sobre el dic. A més, tractant-se d'una zona molt propera del morrot, la perillositat augmenta. Com bé es sabut, el morrot és la zona de major concentració d'energia per un dic generalment regular. Aquesta esquerda pot posar en perill la estabilitat total del dic, començant pel trencament de tot el morrot.



2.5.2.1.3 Comprovació amb els valors de control.

És en aquest punt on majors punts de diferència trobem, per no dir gairebé tots. Segons les taules que s'han presentat anteriorment sobre els límits tolerables d'ultrapassament, proposats dins del Manual EurOtop 2016, tots els valors calculats de cabal d'ultrapassament suggereixen que el actual dic està dimensionat molt per sota dels valors recomanats, quedant-se del costat de la inseguretat.

El fet de que la freqüència de períodes d'ultrapassament sigui en la realitat molt elevada, suggereix que els valors que s'obtenen a través de les taules resta aplica'ls-hi una factor de majoració, perquè siguin compatibles amb el cas actual, o per a onatges amb períodes de retorn menys elevats.

D'altra banda es comprova que a la realitat, tots els problemes que es podrien donar quan hi ha ultrapassaments superiors als rangs establerts pel Manual, comporten el mateix risc que el descrit dins del Manual. Es a dir, que per un període de temporal amb ultrapassament els perills són els mateixos que els descrits pel Manual segons es passen els valors indicats. Més enllà de que els valors calculats amb les formulacions d'ultrapassament escollides siguin sobredimensionats, partir d'aquesta formulació deixa del costat de la seguretat, sempre i quan es pugui assegurar amb anterioritat que realment es compleixen els mateixos riscos tant per observació real com per càlcul analític.

2.5.2.2 CONCLUSIONS DELS RESULTATS OBTINGUTS.

Repasant les comparacions recentment presentades, la majoria d'elles són justificables a favor dels valors obtinguts analíticament. Tot i que s'aprecia un possible sobre dimensionament en els valors que corresponen al dic en talús, tenint en compte els problemes que sempre s'han tingut per ultrapassament en aquest port, treballar amb valors sobre dimensionats ajudarà a garantir quedar-se del costat de la seguretat.

**En definitiva, tenint en compte les observacions indicades, es pot concloure que els valors que s'han obtingut a partir del procés de càlcul analític són coherents i acceptables.**

### **3. SOLUCIONS**

Al apartat D s'ha demostrat analíticament el grau d'ultrapassament que es produeix al port de Cala Ratjada, i que no és admissible per al bon funcionament del port. Tot i que aquests valors són aproximats, el grau és prou greu com per a assumir que una disminució del cabal d'ultrapassament es necessària per a garantir una major seguretat dels vianants com per la activitat pròpia del port.

A continuació s'estudia de manera breu diferents alternatives que es podrien prendre per a millorar aquesta situació, es a dir disminuir la quantitat del cabal d'ultrapassament en el dic. Per a fer aquest estudi i aquestes comprovacions, s'utilitzaran les mateixes fórmules del cabal d'ultrapassament que s'han utilitzat en l'apartat D, modificant segons quin sigui l'anàlisi, les variables, o la fórmula si es proposa un canvi de tipologia.

#### **3.1. INTRODUCCIÓ ALTERNATIVES.**

L'ultrapassament ve determinat per dues característiques principals.

En primer lloc, el clima d'onatge. Aquest ens dona el valor d'alçada d'ona de càlcul característic del nostre projecte i influirà directament al cabal d'ultrapassament. Per una mateixa estructura, a major alçada d'ona l'ultrapassament també serà major.

En segon lloc, la geometria i tipologia del dic també seran les principals variables que modificaran el cabal d'ultrapassament que obtinguem. Segons la tipologia, tal com s'ha vist, les formulacions seran diferents. Cada tipologia serà favorable segons el tipus de clima d'onatge que es tingui. D'altra banda, la geometria també pot afavorir aconseguir un menor cabal d'ultrapassament. Les variables més comunes a variar de la geometria d'un dic són la cota de coronació, l'alçada i l'amplada de la berma en cas de posar-ne, i el pendent i la rugositat del talús (la rugositat no es contemplada en totes les formulacions).

Donat que l'alçada d'ona no pot modificar a menys que canviéssim la ubicació del dic, canviéssim la profunditat del peu d'estructura o variéssim el pendent del fons marí, les alternatives que es proposen giraran entorn a modificar tipologia o característiques geomètriques de l'estructura.

Pel que fa al dic en talús, el cabal que ja s'obté actualment és prou petit, per tant, les alternatives que es contemplaran seran les mes senzilles per un motiu econòmic, com augmentar l'amplada o l'alçada de la berma, o disminuir el pendent del talús.

En canvi, les alineacions 2 i 3, dics en parcialment en vertical, i vertical respectivament, els cabals obtinguts són molt elevats, pel que es plantejarà tant un canvi de tipologia com canvis en la pròpia geometria.

Sempre, per totes les alineacions, es tindran en compte els criteris econòmics i d'execució per avaluar les alternatives possibles, no només el valor final d'ultrapassament. Els criteris econòmics i d'execució no s'estudiaran a fons, sinó que s'avaluarà el seu pes en el conjunt de l'obra global.

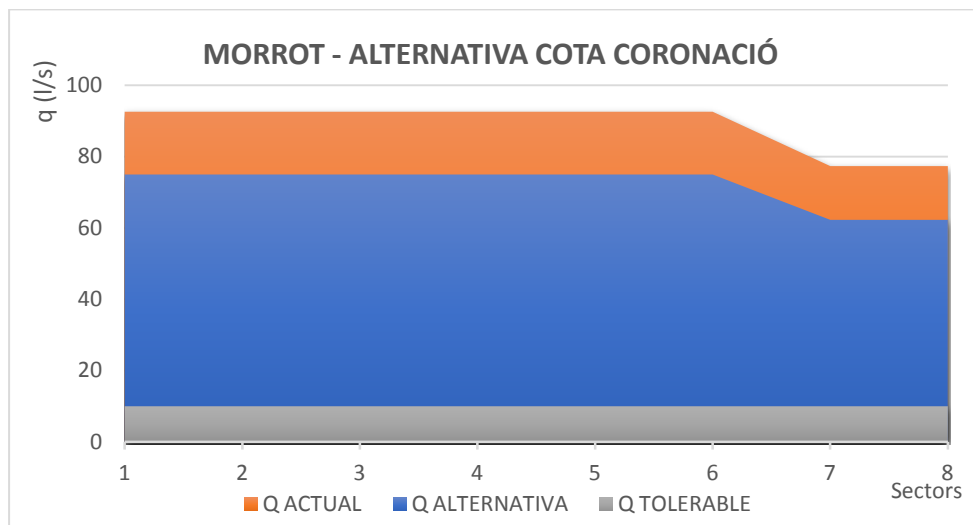
### 3.2. ALTERNATIVES

#### 3.2.1. ALINEACIÓ MORROT.

Aquesta és una alineació amb dic vertical completament reflectant on actualment es dona el major ultrapassament de tot el dic extern. Les característiques principals a tenir en compte en aquest dic és que el peu de l'estructura es troba a una profunditat d'entre els 8.5 i 7.5 metres, la cota de coronació és a la cota 7, el tipus d'onada que arriba és impulsiva i el tipus de categoria d'onada és impulsiva i en trencament.

Es comença per descartar la possibilitat de executar un canvi de tipologia per passar de dic vertical a dic en talús. Com es tracta d'una dic vertical realitzat amb caixons de formigó submergits amb sorra i formigó, no es pot executar, mentre està en servei, un terraplè de base per al mantell principal. Per tant, el risc de enfonsaments i sobrepressions és molt elevat, i més coneixent els problemes que han hagut d'aquest tipus. D'altra banda, executar un talús amb 8 metres de profunditat al morrot, comportaria disminuir el pas d'entrada i sortida de la bocana del port, i per tant, no resulta positiu.

Seguidament s'estudia l'alternativa més senzilla de fer créixer la cota de coronació 1 metre i mig i col·locar-se sobre els 8.5 metres per sobre del nivell del mar. **Aquesta mesura comporta una reducció força reduïda, gairebé d'un 20%.**



La segona alternativa que també es planteja és actuar a la base del dic, i crear una berma que afecti a l'onada abans de xocar amb el dic. Per a que la berma pugui afectar a l'onada la seva alçada mínima ha de ser 3.2 metres. Es proposa una berma de 4 metres d'alçada, i s'estudia els seus efectes en el cabal d'ultrapassament.

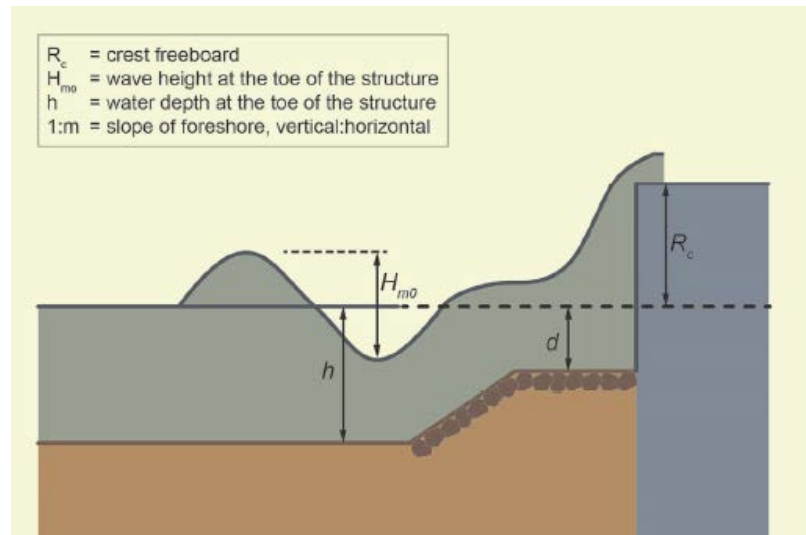
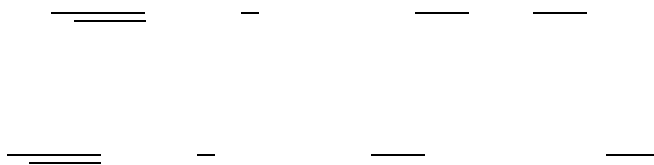
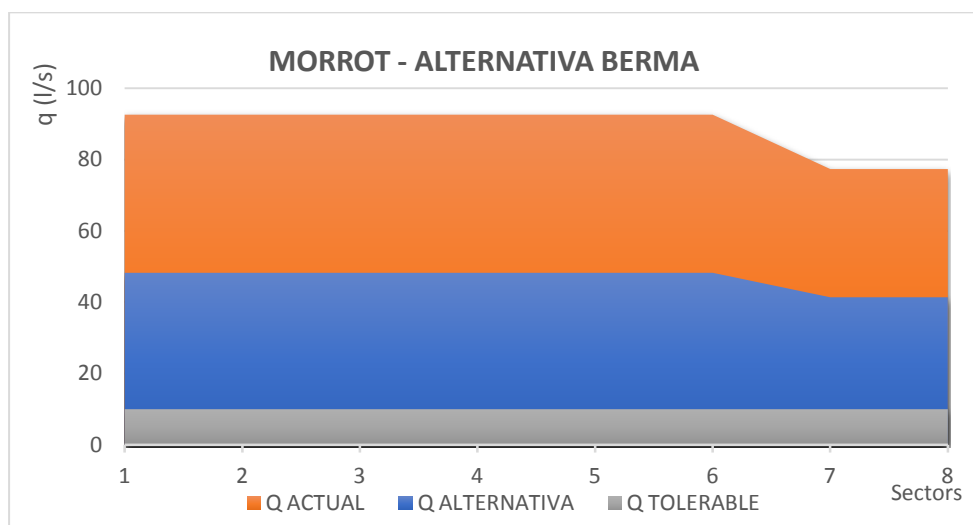


Fig 90. Esquema dic amb berma submergida. (Font: EurOtop 2016)

Per estudiar l'efecte que té la incorporació d'una berma davant del dic vertical, seguim les indicacions proposades dins del Manual EurOtop 2016. Trobem que per unes condicions en impulsives hi ha dues formulacions diferents per a calcular el cabal d'ultrapassament segons l'alçada relativa del dic exterior. Per aquest cas, es presenten totes dues formulacions, tot i que, pel dic existent la classificació és de dic baix, per les característiques del dic i d'alçada d'ona, per valors més alts de cota de coronació el dic es pot considerar alt.



Aplicant doncs les formulacions presentades es troba que **la incorporació d'una berma davant de la estructura pot donar reduccions d'ultrapassament molt considerables, al voltant del 48%**. Al ser un càlcul analític es donen unes relacions aproximades.



La tercera opció que s'ha plantejat és la de incorporar un bullnose a la coronació del mur. Donat que el tipus d'ultrapassament que es sol donar per aquesta alineació no és de tipus spray, aquesta alternativa pot ser molt efectiva.

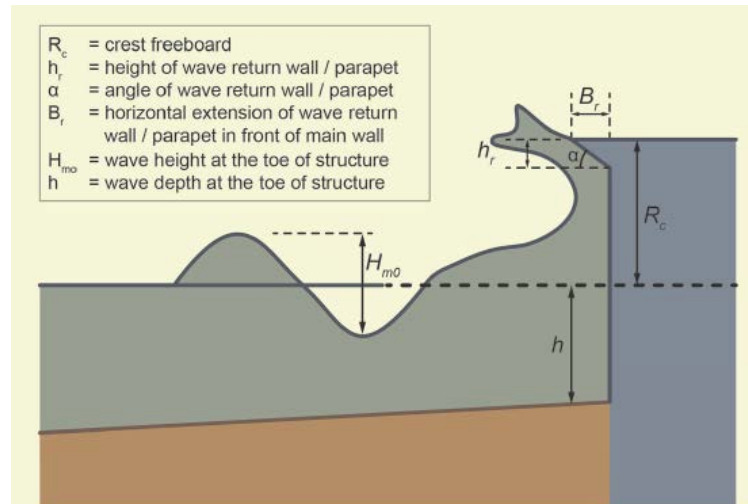


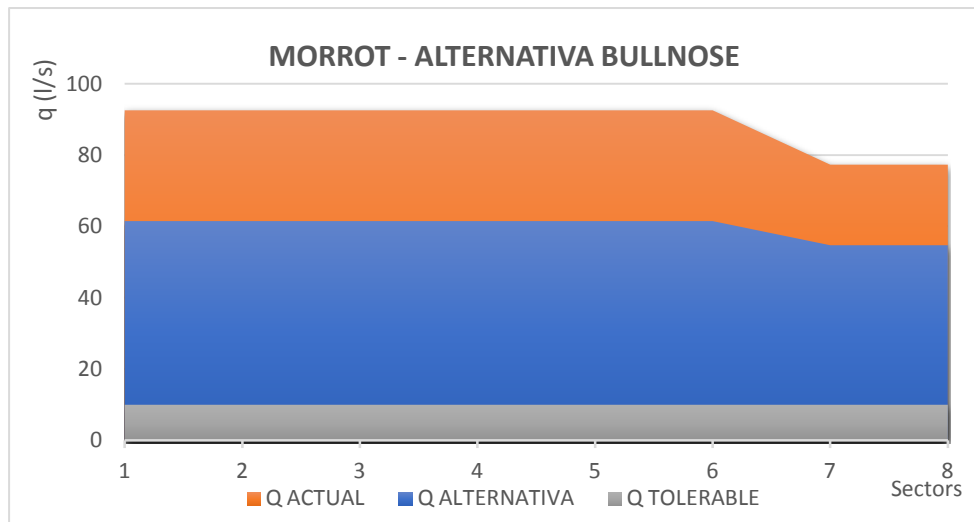
Fig 91. Esquema dic amb bullnose. (Font: EurOtop 2016)

La principal característica del BULLNOSE és aturar i enretirar el Run-up que s'acabaria convertint en ultrapassament. Afegint un cert angle a la coronació del mur en direcció exterior, l'onada tindrà més dificultats per a passar per sobre l'estructura. S'estudia la afecció del Bullnose segons les formulacions d'EurOtop 2016. En primer lloc el bullnose s'analitza com un factor de reducció de l'ultrapassament que s'havia de donar.

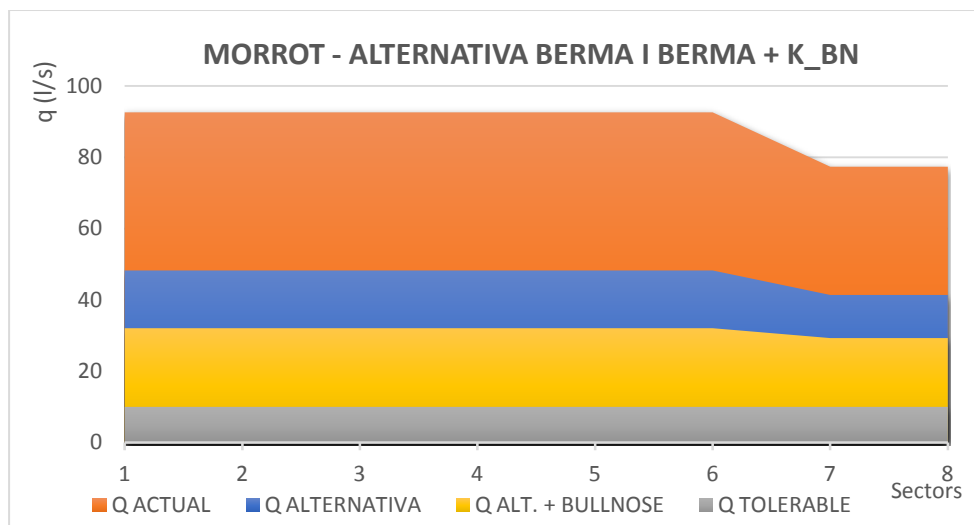
Per a saber quina formulació s'ha d'utilitzar per a calcular el coeficient de reducció, s'ha d'estudiar la relació entre alçada del dic i l'onada incident, i veure quin tipus de reduccions es poden donar, petites, intermèdies o altes. En el present projecte sempre parlarem de reduccions intermèdies, i per tant calcularem el coeficient de reducció amb la següent fórmula.

Es recomana que només s'utilitzi el càlcul analític quan el coeficient  $K_{bn}$  sigui major de 0.05.

Analitzant els resultats que s'obtenen, **la incorporació d'aquesta alternativa suposa una reducció del 50% aproximadament del valor calculat.**



Finalment, com que ninguna de les 3 opcions dona una reducció suficient com per garantir la seguretat desitjada, es calcula la reducció de cabal aplicant les 3 opcions, per tant, incorporant una berma, augmentant la cota de coronació mes un BULLNOSE. Els resultats que s'obtenen son prou correctes per considerar-los una millora representativa del estat actual, i una gran millora per a la seguretat i realització de les activitats dins del port.

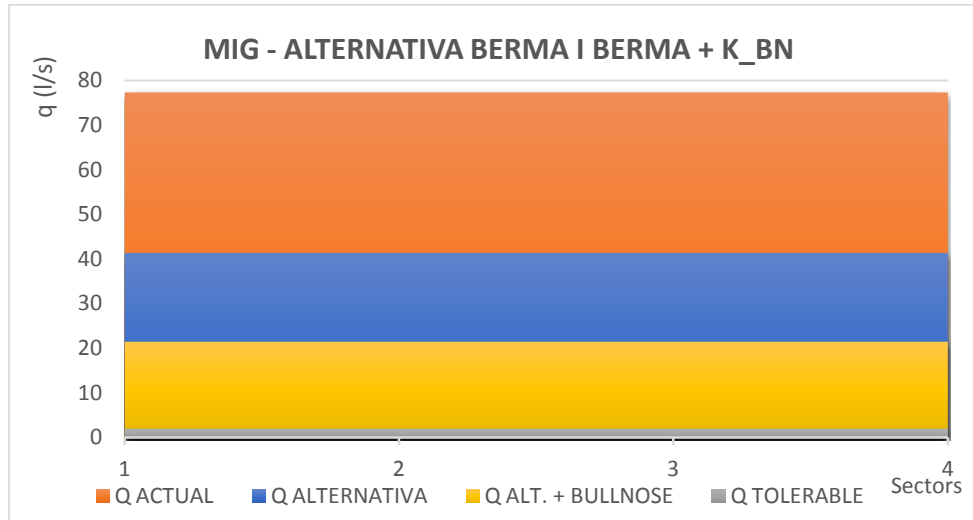


### 3.2.2. ALINEACIÓ MIG.

Ens trobem a continuació amb la alineació de transició entre la tipologia en vertical i la tipologia en talús. Això comporta que per la zona més propera al dic en talús hi podem trobar un inici de protecció amb escullera al peu de la estructura. Així doncs la profunditat del peu d'estructura oscil·la entre els 7.5 i 6.5. Per la resta de característiques principals a tenir en compte, coincideix amb l'Alineació del morrot: onades en trencants i cota de coronació als 7 metres.

Per aquesta alineació les alternatives s'han estudiat separant-les en dos grups: modificar la geometria i modificar la tipologia.

Pel que fa a la geometria, es plantegen les mateixes opcions que a l'alineació anterior, creixement de la coronació del dic, incorporació d'una berma i incorporació d'un bullnose. S'obtenen en proporció els mateixos resultats que en l'alineació anterior, aplicant les 3 característiques, **aconseguim una reducció del 70% aproximadament del cabal d'ultrapassament.**



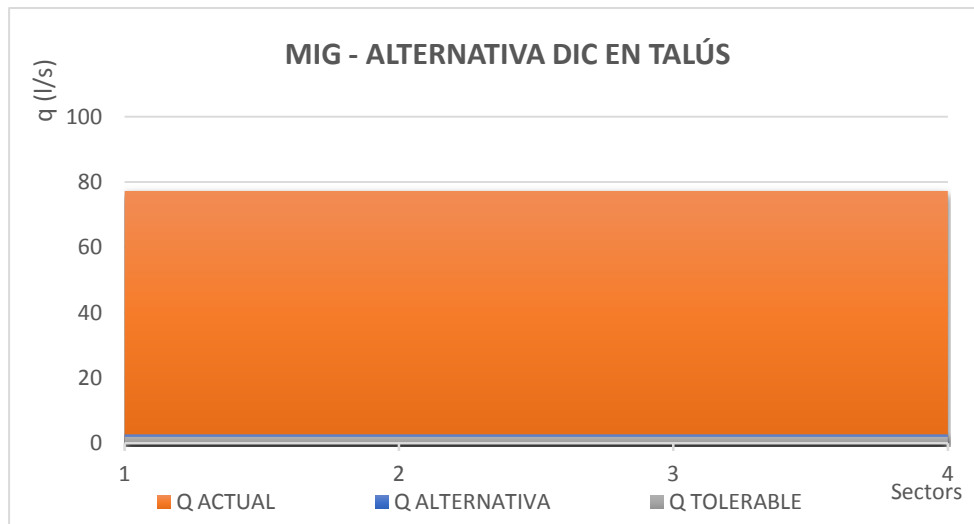
S'estudia a continuació la possibilitat de canviar la tipologia del dic, i passar d'un dic parcialment vertical, a un dic en talús, mantenint els mateixos criteris que en l'alineació de la costa, existent i en talús. Aquesta alternativa és considerada en aquest cas, pel fet que per la part nord ja existeix així, i la profunditat del peu és menor, i es una alternativa operacional i econòmicament viable.

El càlcul d'aquesta alternativa es preveu com a continuació del dic en talús ja existent, amb les mateixes característiques aproximadament, i per tant podent fer servir la mateixa formulació. Com l'onada incident per aquest cas és major que en l'alineació de la costa, és realitza la proposta allargant l'amplada de la berma i fent un talús amb pendent més suau, que tot col·laborarà a disminuir els valors de cabal d'ultrapassament. Alhora, també es proposa una pujada de cota de coronació d'un metre, arribant a la cota de 8 metres.

Calculant amb la formulació utilitzada en l'apartat D per dics en talús proposada pel CEM, **s'obté una disminució del cabal d'ultrapassament molt bona, al voltant del 90%.**

Totes dues alternatives estudiades, la variació geomètrica com el canvi de tipologia, donen unes disminucions molt considerables, i completament acceptables com a proposta de millora del dic actual. Però en aquest estudi es pren com a **proposta de millora el canvi de tipologia**. Tot i que econòmicament és més favorable l'alternativa de variar la geometria, per a les condicions de clima d'onatge que es tenen, tot el dic exterior del port de Cala Ratjada hauria de ser dic en talús. Per tant, la diferència econòmica es suficientment petita com per ser menyspreada en favor a la millora qualitativa del propi dic, i en favor de la seva seguretat i funcionalitat. A continuació es mostren els valors resultants.





Els valors finals de cabal d'ultrapassament no s'aprecien amb claredat, així doncs per a donar una mica de més de llum també s'adjunta la taula resum.

ESTUDI ALTERNATIVA - MIG	Q (l/s)
Q ACTUAL	77
Q ALTERNATIVA. DIC TALÚS	3
Q TOLERABLE	2

### 3.2.3. ALINEACIÓ COSTA.

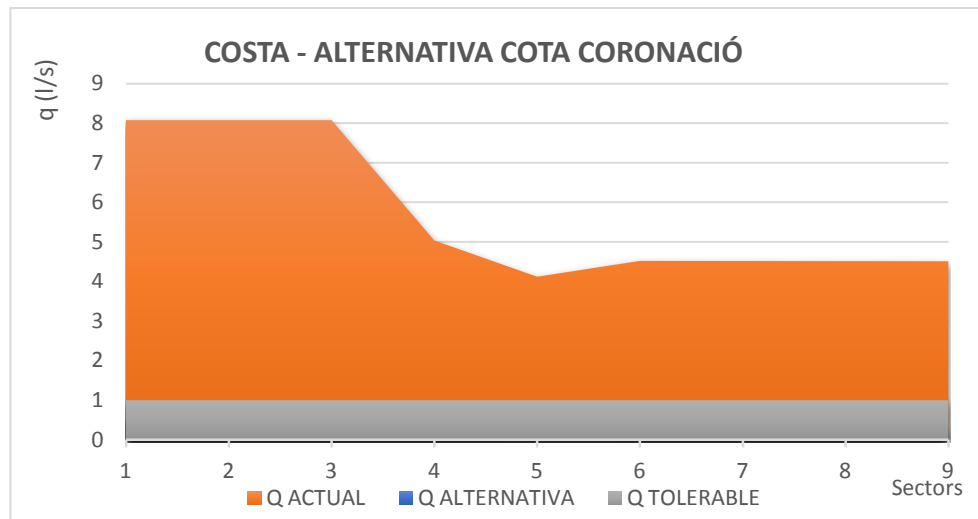
Observant els resultats d'aquest estudi, com era d'esperar, per aquesta alineació trobem el menor ultrapassament de tot el dic exterior. És de tipus dic en talús, tipologia adequada per el tipus d'onatge que es té en aquest port. Tot i així encara es dona cert ultrapassament, valors per sobre dels que s'han establert com a tolerables. Per tant, es proposa una solució prou senzilla que approximi el cabal d'ultrapassament a valors acceptables, entre 0.1 i 1 l/s, donada la situació del dic dins del port.

Les tres variacions que s'estudien són, augment de cota de coronació, augment d'amplada de berma i talús més suau.

#### I. Variació de cota de coronació.

Primer alternativa i és la més econòmica. L'afectació al dic es mínima, serà operable sense cap problema i només afectarà a la coronació del dic. El contra principal que te aquesta alternativa es l'impacte paisatgístic. Sempre s'intenta obtenir una cota de coronació suficientment baixa com per que no afecti en excés les vistes.

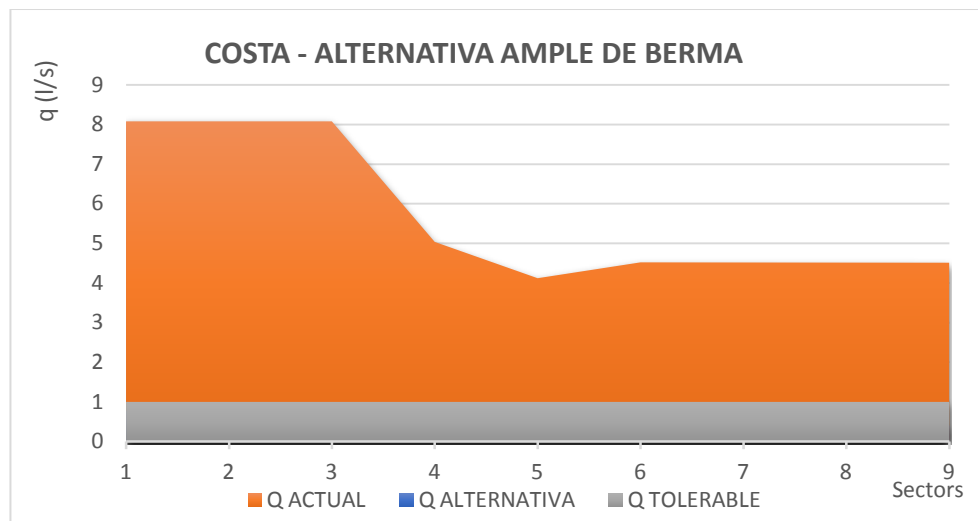
Es proposa un augment de la cota d'un metre, arribant als 7.5 metres de cota de coronació. Aquesta alternativa aconsegueix reduir el cabal d'ultrapassament a **1-2 litres/s, que es tradueix en una reducció del 90%.**



## II. Variació de amplada berma.

Aquesta segona alternativa és probablement la que més difícil es faci d'executar, i per tant, la pitjor alternativa a valorar econòmicament. L'ampliació de la berma comporta operar al mar, el que sempre encareix les obres, i d'altra banda, comporta un moviment d'escullera de la coronació del talús pera col·locar dues noves fileres de caixons de formigó. A posteriori s'haurà de redibuixar el talús amb nova escullera i blocs de formigó.

Al càlcul d'alternatives, es proposa un augment de la berma fins arribar als 10 metres d'amplada. **Aquesta millora suposa una disminució del cabal d'ultrapassament del 85%.**

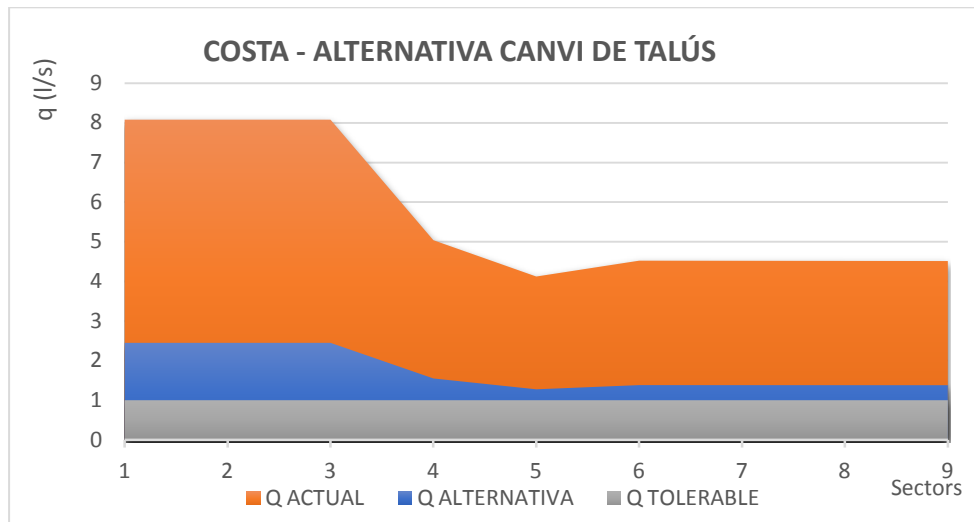


## III. Variació de l'angle del talús.

Aquesta alternativa surt més econòmica que la variació de l'amplada de la berma, donat que només comporta a redibuixar el talús amb escullera o blocs de formigó

nous. Però, s'ha d'operar dins del mar, el que comporta un increment del seu cost a destacar.

**Una disminució de l'angle del talús comporta una reducció del 70% del cabal d'ultrapassament.**



Analitzades les 3 alternatives possibles, es proposa com a possible solució el augment de la cota de coronació, donat que és la solució més econòmica, amb major reducció del cabal d'ultrapassament i alhora l'aspecte negatiu de tenir un mur alt, es relatiu, considerant que els dics que continuen estan a una cota similar, i si més no les solucions proposades superen la cota de coronació que es proposa com a solució.

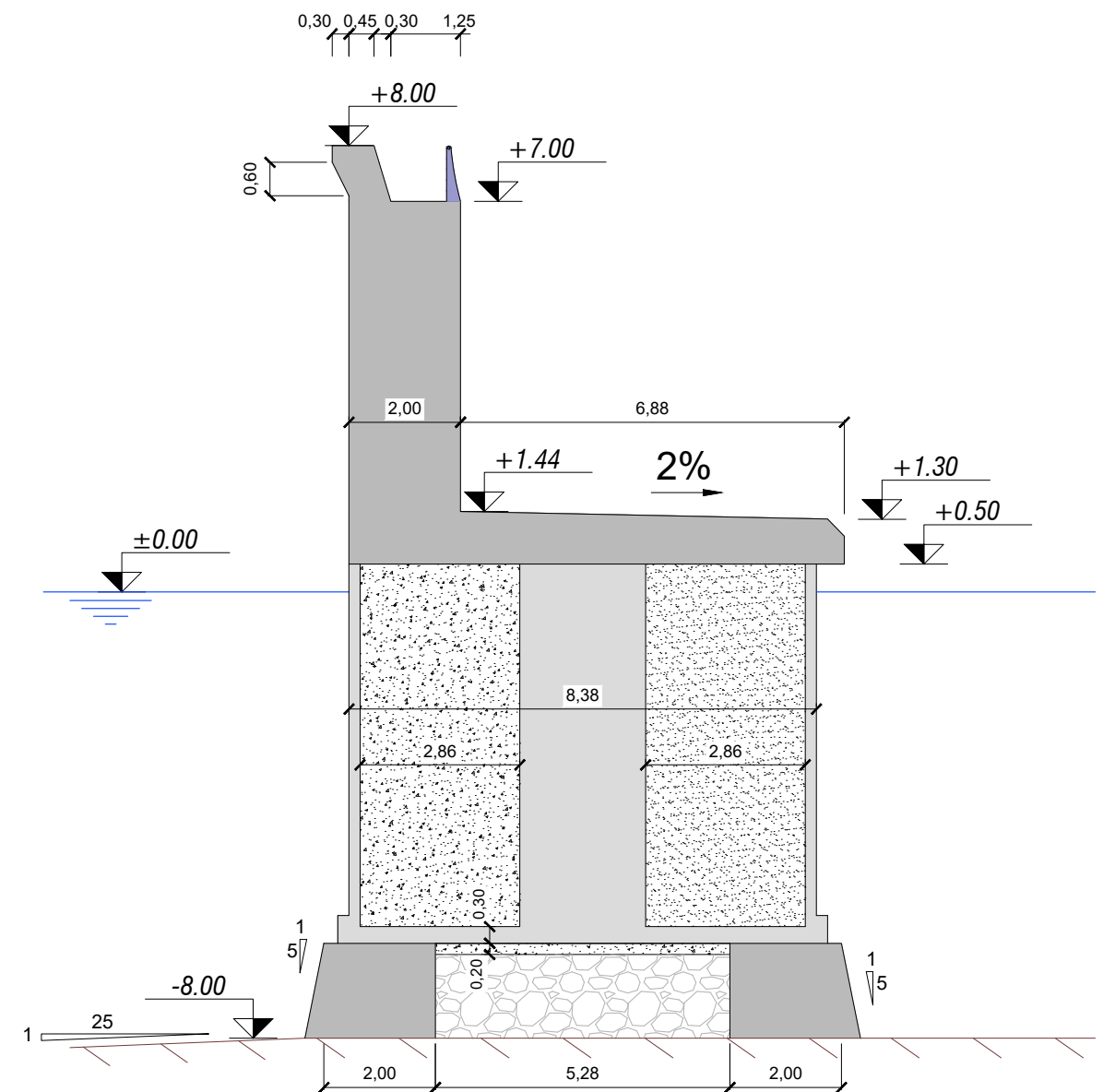
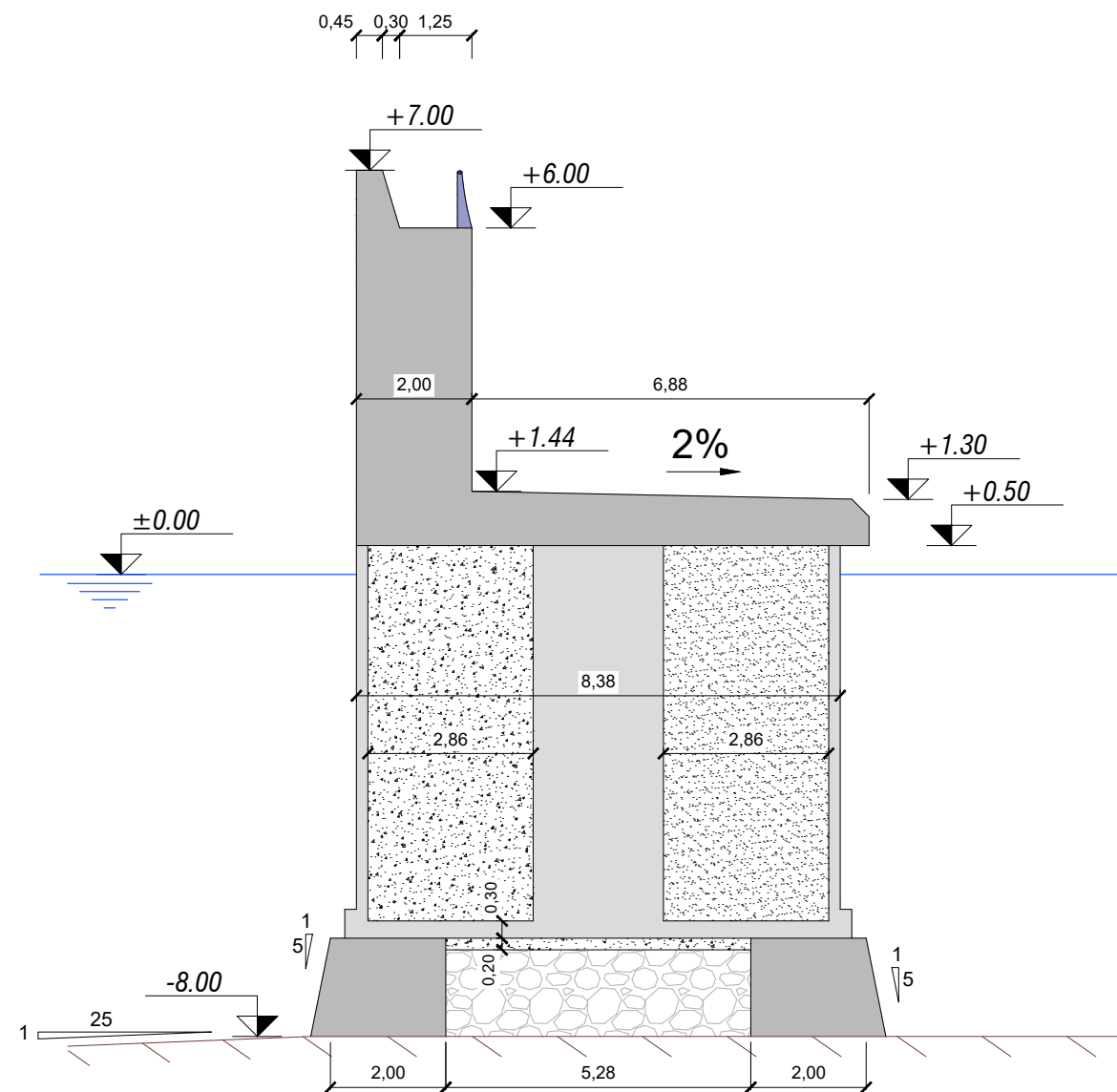


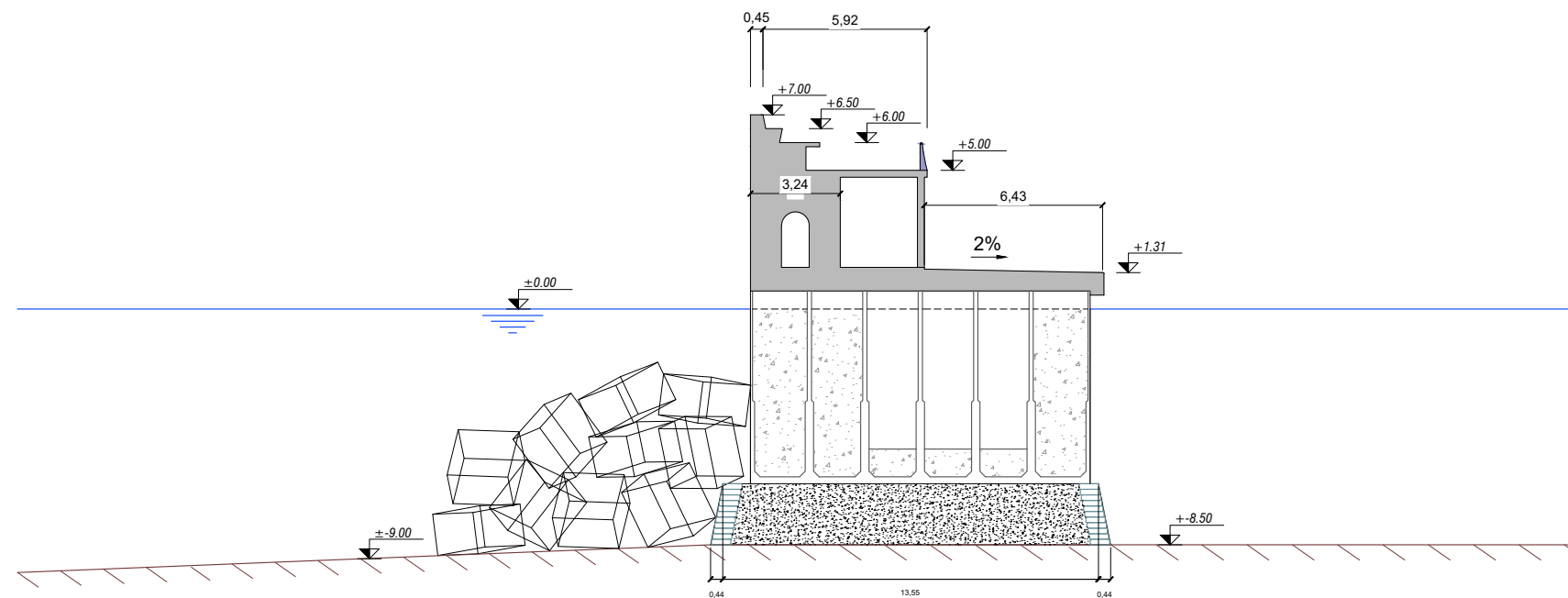
#### **4. PERFILS**

S'han realitzat, de manera esquemàtica, els perfils de les seccions estudiades tant en la situació actual com en la situació amb la alternativa proposada al apartat de Solucions. Per a cada fulla hi trobarem la situació actual i la futura, per a poder fer la corresponent comparativa.

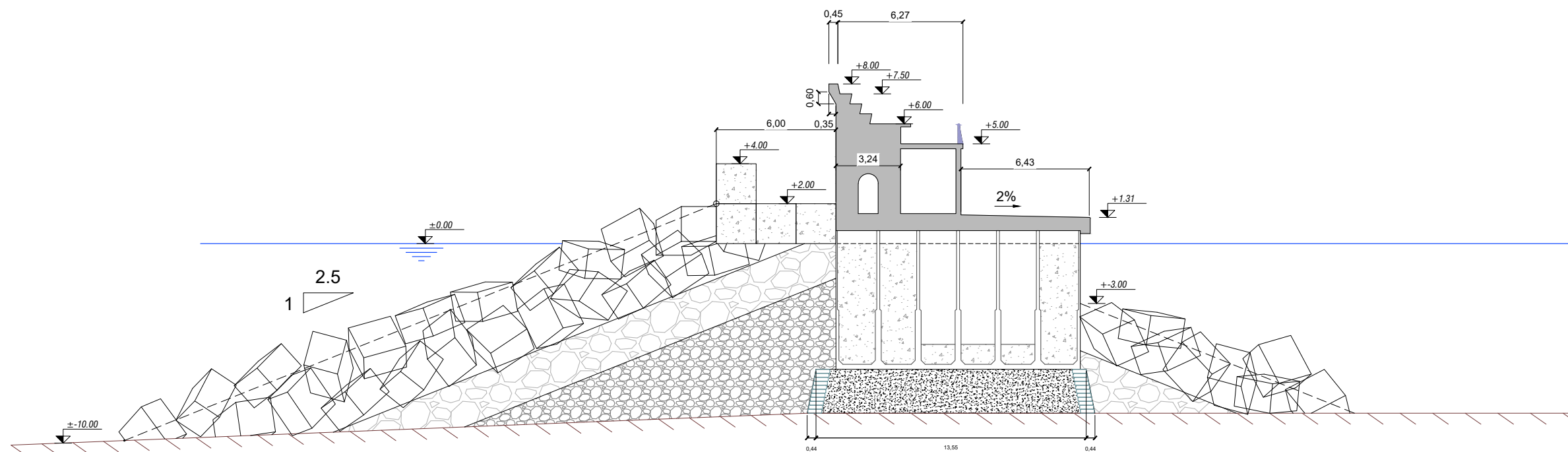
Trobarem un total de 4 plànols.

- 1 plànol per a la secció de l'alineació del morrot.
- 2 plànols per a les seccions de l'alineació del mig.
- 1 sol plànol per a la secció de l'alineació de la costa.



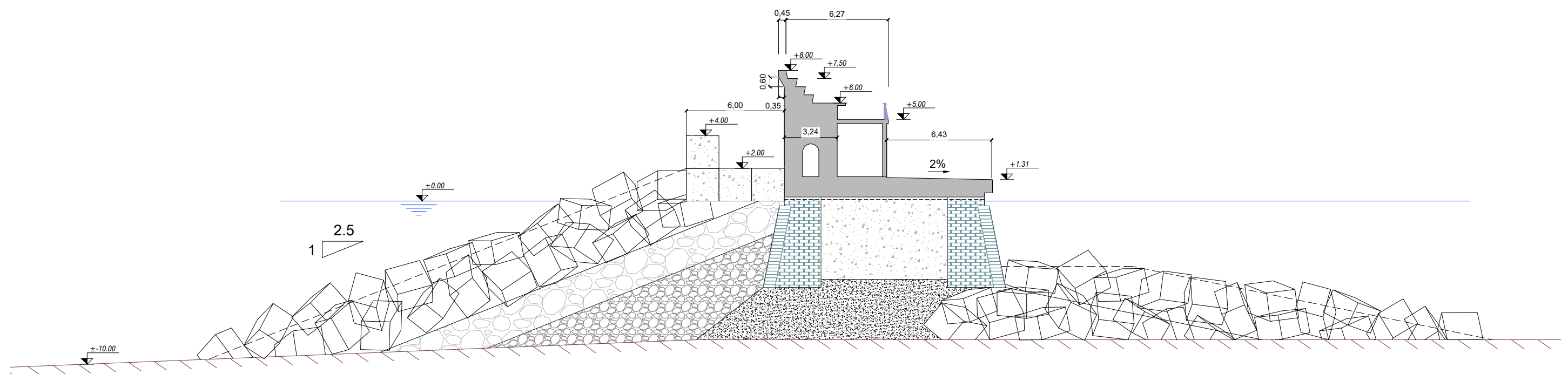
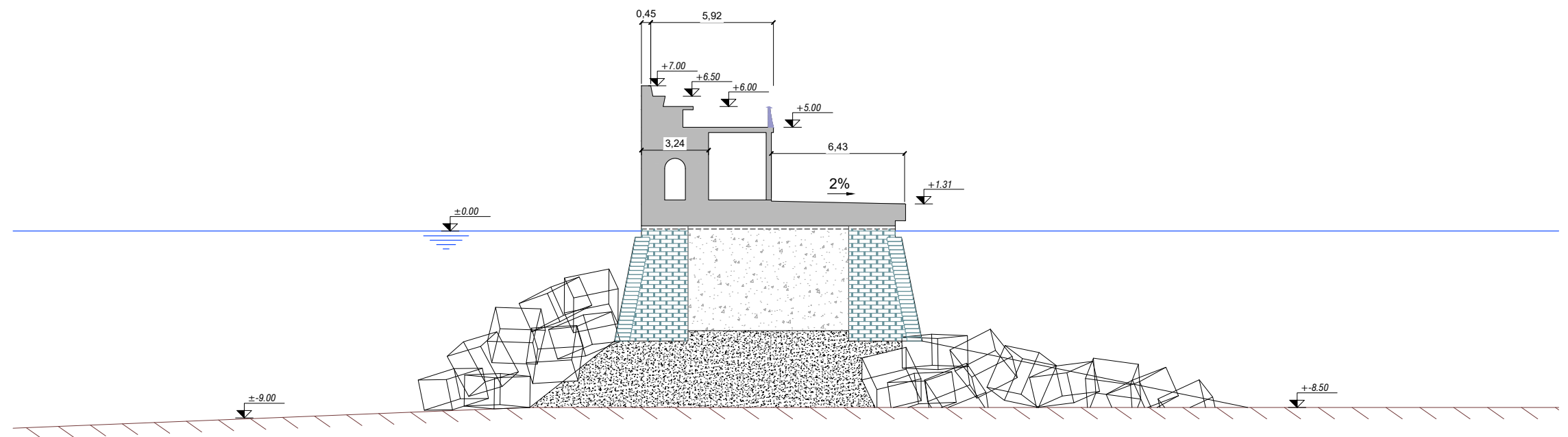


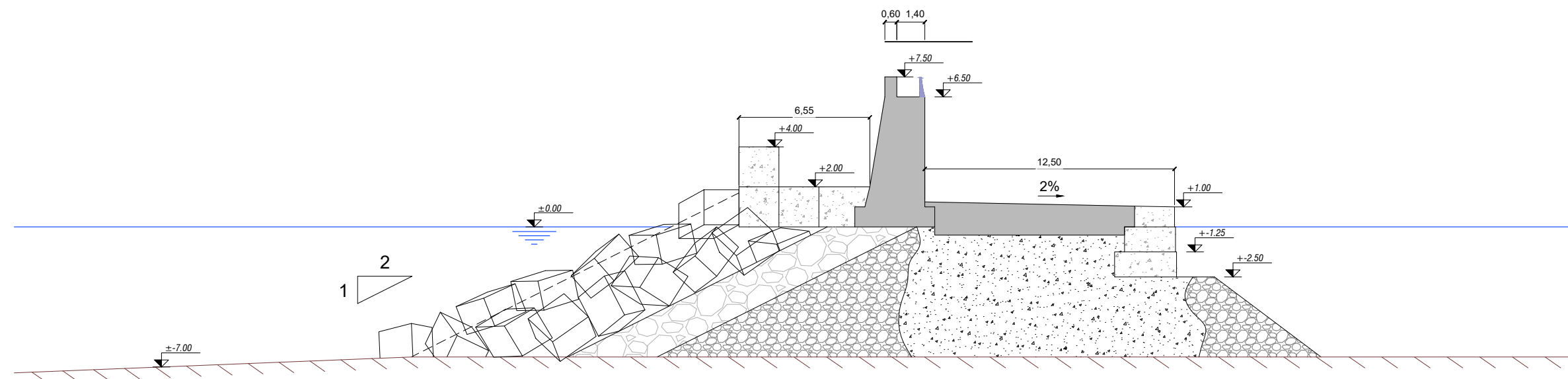
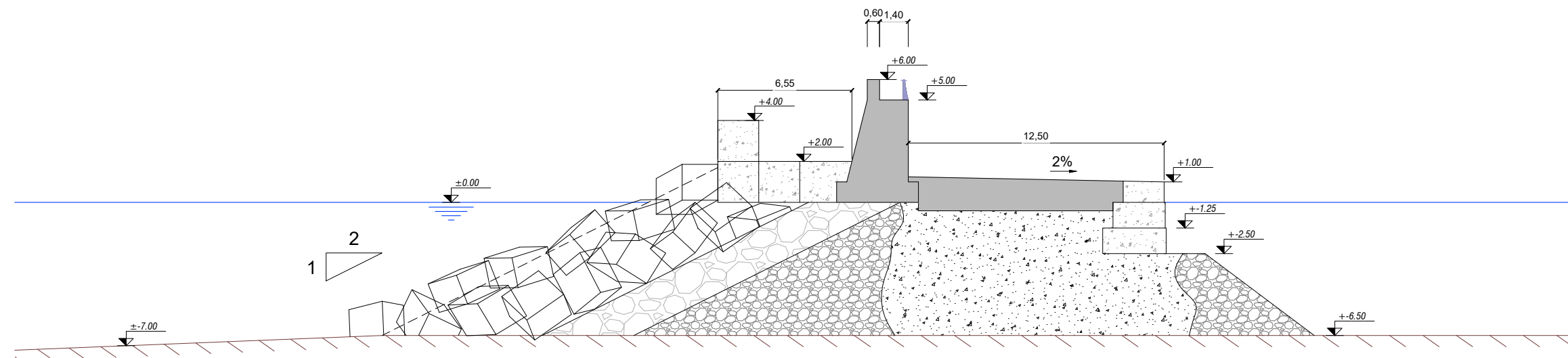
PERFIL ALINEACIÓ MIG SECCIÓ 1  
SITUACIÓ ACTUAL



PERFIL ALINEACIÓ MIG SECCIÓ 1  
ALTERNATIVA









## 5. CONCLUSIONS

Amb tots els resultats sobre la taula, tant els de situació actual com els de les possibles solucions presentades, observats els antecedents i estudiada la història del port de Cala Ratjada, i analitzat les conseqüències dels temporals que es donen en aquest port actualment i la freqüència en que es donen, es realitza una valoració que ens permet descriure les conclusions descrites a continuació. Per a ser més esquemàtic, es separen les conclusions en les diferents temàtiques tractades al llarg d'aquest estudi.

Només observant els darrers temporals i fent una mica de recerca sobre l'actualitat del port, es comprova la necessitat de realitzar un estudi com el que es proposa, i altres estudis derivats o relacionats, un bon exemple es l'agitació interna del port. Tant les imatges obtingudes, com els testimonis entrevistats, demostren una clara insuficiència en el dimensionament del dic exterior del port de Cala Ratjada. Per tant, aquest estudi, tot i ser un primer planteig, es considera plenament vàlid i necessari per a continuar amb la millora del port.

Una de les conclusions més clares és que l'ús de programari en models numèrics per a realitzar càlculs i anàlisis a enginyeria portuària i marítima, és una condició indispensable. Tot i que comporti un procés previ de elaborar tots els arxius necessaris per a la seva execució, que resulta laboriós, les facilitats que proporciona, i el detall del càlcul són necessaris en aquest tipus d'estudi. Donat que en aquest tipus d'estudis, la incertesa d'alguns càlculs és major que en altres estudis, obtenir una major precisió en alguns punts comporta una gran millora. D'altra banda, permet analitzar amb major detall quines són les forces que es poden desenvolupar al llarg del dic, i que ens permet preveure on podria haver més problemes, tant estructurals com de servei.

Tota la informació de base tractada es coherent i prové de fonts fiables, per tant, els resultats obtinguts en l'apartat 2 es donen per vàlids. Analitzant aquests resultats es pot assegurar que tot i que els resultats són un valor aproximat, per aquests valors o similars el port de Cala Ratjada té un dimensionament completament insuficient pel que fa a l'Ultrapassament. Aquests resultats obliguen a pensar que es requereix immediatament una clara millora del dic exterior, perquè el port pugui millorar les seves prestacions.

Es proposen un seguit de solucions de les quals només es presenten resultats de cabal d'ultrapassament. Però, evidentment no només es pot tenir en compte aquest factor. Tot i això, les alternatives proposades són prou factibles, tenint en compte les variacions segons alternativa, tant en execució com econòmicament. Es proposen alternatives senzilles i que puguin causar el menor impacte al servei del port possible. **Les propostes proposades aconseguixen reduir el cabal d'ultrapassament un 65% per l'alineació MORROT, i més del 90% per les alineacions tant del MIG com COSTA.** Observant aquestes disminucions de cabal d'ultrapassament, es valora com a positiu fer la despesa econòmica per millorar el dic, i alhora obtenir un mínim de 60% de disminució del cabal d'ultrapassament.

Sent més específic, els resultats estudiats porten a pensar en que el disseny d'aquest port és erroni pel que fa a la definició de la seva tipologia. Pel tipus d'onada que arriba, en aquest cas en trencants, la col·locació d'un dic en vertical pot donar problemes greus, tant estructurals com d'ultrapassament, segurament amplificats per la reflexió que provoca. Es recomana

estudiar la possibilitat d'executar un nou dic exterior de tipus en talús, ajustant primerament l'alçada d'ona de càlcul. Per aquest procés, també es recomana tenir en compte sempre, el possible efecte de la reflexió sobre l'ona incident. En un mur completament reflectant i amb les onades impulsives incidint contra ell, la reflexió pot fer augmentar considerablement l'alçada d'ona incident.

L'estudi d'ultrapassament en un obra de protecció marítima per mètodes numèrics mai resulta ser una tasca fàcil. Les formulacions amb les que es treballen no són mai lo suficient exactes com per garantir uns resultats 100% representatius. El fet d'utilitzar formulacions de estudis empírics de ports similars, tant pel que fa al càlcul d'onada de trencament com el càlcul del cabal d'ultrapassament, porta a entendre que existeix un cert grau d'incertesa dins dels resultats que s'obtinguin. Per tant, un estudi de la magnitud del presentat, és una bona alternativa com a estudi de predimensionament dels valors de cabal, i tenir una visió general dels principals problemes que es poden donar. Però la principal recomanació a donar és la de realitzar aquest mateix estudi a partir de mètodes reals i físics, es a dir, realitzar proves de canal, tant en 2D com en 3D. Per totes aquelles estructures que protegeixen elements molt delicats, o la seguretat civil depenen d'elles, serà necessari un estudi d'aquest tipus.

Els estudis que es realitzen a canal o amb models reals, donen sempre uns resultats amb molt menor grau d'incertesa, calculant el comportament d'una onada característica del nostre clima d'onatge, i a partir d'una reproducció del nostre port a una escala reduïda, els resultats que s'obtinguin seran característics d'aquest port i estaran imitant altament els possibles resultats que es podrien donar a la realitat.

Per tant, de cara a tirar endavant a realitzar un estudi més a fons d'aquest tema, es fa necessari l'ús de models reals per al seu correcte anàlisi, tant sigui en 2D com en 3D.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- (1) GODA. Y. (1985): *"Random Seas and Design of Maritime Structures."*
- (2) Overtopping Manual (2016): *"EurOtop Manual 2016".K*
- (3) U.S. Army Corps of Engineers (2011): *"Coastal Engineering Manual"*.
- (4) EDF R&D (2011): *"Tomawac software for sea State modelling on unstructured grids over oceans and coastal seas"*.
- (5) EDF R&D (2016): *"TELEMAC MODELLING SUSTEM 2D hydrodynamics TELEMAC-2D Software Release 7.2 OPERATING MANUAL"*.
- (6) EDF R&D (2016): *"TELEMAC MODELLING SUSTEM 2D hydrodynamics TELEMAC-2D Software Release 7.2 REFERENCE MANUAL"*.
- (7) CANADIAN HIDRAULICS CENTRE (2011): *"Blue Kenue: Reference Manual"*.
- (8) Jentsje W. Van der Meer (2002): *"Wave Boundary Conditions And Overtopping In Complex Areas"*.
- (9) Jentsje W. Van der Meer (2005): *"Wave Transimssion And Reflection At Low-crested Structures: Design Formulae, Oblique Wave Attack And Sepctral Change"*.
- (10) F. D'Alessandro, G.R. Tomasicchio, G. Chiaia, F. Ciardulli, A. Francone (2016): *"NUMERICAL MODELLING OF BREAKER DEPTH INDEX"*.
- (11) M. Hebsgaard, P. Sloth and J. Juhl (1998): *"WAVE OVERTOPPING OF TUBBLE MOUND BREAKWATERS"*.
- (12) T.S.Hedges. *"Wave Breaking and Reflection"*.
- (13) W.Allsop, T.Bruce, J.Pearson and P.Besley (2005): *"Wave Overtopping at vertical and steep seawalls"*.
- (14) J.M.Berenguer, A.Baonza. *"Diseño del Espaldon de los Diques Rompeolas"*.
- (15) American Society of Civil Engineers (1995): *"Coastal Engineering"*.
- (16) D.E.Reeve, A.J.Chadwick and C.A.Fleming (2012): *"Coastal Engineering – Processes, Theory and Design Practice"*.
- (17) B.Camenen and M.Larson. *"Predictive Formulas for Breaker Depth Index and Breaker Type"*.